11-2026 | ISSN 2734-9888 | tapchixaydung.vn

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA BỘ XÂY DỰNG

JOURNAL OF CONSTRUCTION



CÔNG TY TNHH NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX

NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX
MÁC 40/50
ĐẠT TỐI THIỂU
PG70
THEO CHUẨN PHÂN LOẠI NHỰA ĐƯỜNG THEO PG (TCVN 13049:2020)

NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX
MÁC 40/50

GIẢI PHÁP MỚI CHO THI CÔNG ĐƯỜNG BỘ VÀ SÂN BAY

MÁC KIM LÚN
40/50

DO CÔNG TY TNHH NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX SẢN XUẤT TẠI CÁC NHÀ MÁY:

- Nhà máy Nhựa đường Petrolimex Thượng Lý - Hải Phòng
- Nhà máy Nhựa đường Petrolimex Cửa Lò - Nghệ An
- Nhà máy Nhựa đường Petrolimex Thọ Quang - Đà Nẵng
- Nhà máy Nhựa đường Petrolimex Nhà Bè - TP HCM

ĐẶC TÍNH CƠ HỌC CHẤT LƯỢNG CAO
Đáp ứng yêu cầu kỹ thuật khắt khe cho các công trình đường bộ và sân bay.

KHẢ NĂNG CHỐNG HẰN LÚN VƯỢT TRỘI
Cải thiện hiệu suất, tăng độ bền mặt đường, kéo dài tuổi thọ công trình.

HIỆU QUẢ TỐI ƯU
Tối ưu hóa hiệu quả sử dụng, nâng cao chất lượng công trình.

CHI PHÍ HỢP LÝ
Hiệu quả kinh tế cao, phù hợp với nhiều loại hình dự án.



THI CÔNG BTN SỬ DỤNG NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX 40/50 TẠI SÂN BAY PHÙ CÁT 2026

ỔN ĐỊNH NHIỆT TỐT
Ít lão hóa, duy trì tính năng lâu dài

CHỊU TẢI TRỌNG LỚN
Phù hợp điều kiện tải trọng lớn, lưu lượng giao thông cao

CHỐNG HẰN LÚN VƯỢT TRỘI
Tăng tuổi thọ mặt đường, giảm chi phí bảo trì

THÂN THIỆN MÔI TRƯỜNG
Giảm phát thải, hướng tới phát triển bền vững

Web: www.plc.petrolimex.com.vn | Điện thoại: 024 3851 3206

TỔNG CÔNG TY THĂNG LONG - CTCP

Địa chỉ: Số 72 Nguyễn Chí Thanh - phường Láng - TP Hà Nội
VP giao dịch: Tầng 5, Tòa nhà Tasco, lô HH2-2, Phạm Hùng, phường Nam Từ Liêm, TP Hà Nội
Điện thoại: 091.555.43.42 Email: tlg@tlg.com.vn

Cầu Kỳ Lộ (Dự án cao tốc đoạn Quy Nhơn - Chí Thạnh)



Cầu Bến Mới (Ninh Bình)



Dự án thành phần Chí Thạnh - Vân Phong thuộc Dự án xây dựng đường bộ cao tốc Bắc - Nam phía Đông



Cầu Phật Tích (Bắc Ninh)

MỤC LỤC CONTENT

11.2026 tapchixaydung.vn

HỘI ĐỒNG KHOA HỌC:
PGS.TS Phạm Minh Hà - Chủ tịch Hội đồng
PGS.TS Lê Trung Thành - Thường trực Hội đồng
PGS.TS Vũ Ngọc Anh - Ủy viên
GS.TS Nguyễn Việt Anh - Ủy viên
PGS.TS Phạm Xuân Dương - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Hà - Ủy viên
TS Nguyễn Hồng Hải - Ủy viên
TS Lê Quang Hùng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Văn Hùng - Ủy viên
TS Khuất Việt Hùng - Ủy viên
PGS.TS.KTS Hoàng Vĩnh Hưng - Ủy viên
GS.TS Phạm Huy Khang - Ủy viên
GS.TS.KTS Doãn Minh Khôi - Ủy viên
GS.TS.KTS Nguyễn Tố Lăng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Ngọc Long - Ủy viên
GS.TS Phan Quang Minh - Ủy viên
TS Phan Hữu Duy Quốc - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thanh Sang - Ủy viên
GS.TS Phạm Cao Thăng - Ủy viên
GS.TS Trịnh Minh Thụ - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Hồng Tiến - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thị Tuyết Trinh - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Tùng - Ủy viên
PGS.TS Tống Trần Tùng - Ủy viên

TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Thái Bình
PHÓ TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Văn Hường
Phạm Văn Dùng
Nguyễn Thanh Hoa
Lý Ngọc Thanh

TÒA SOẠN:
Tầng 3, Số 308E Minh Khai, phường Tương Mai, TP Hà Nội
Phòng Thư ký - Biên tập (tiếp nhận bài): 024.39740744
Email: banbientap@tapchixaydung.vn
Văn phòng đại diện phía Nam:
17A Hồng Hà, phường Tân Sơn Hoà, TP.HCM.
Giấy phép xuất bản:
Số 14/GP-BVHTTDL, ngày 11/4/2025.
ISSN: 2734-9888
Mã số thuế: 0100931323
Tài khoản: 113000001172
Ngân hàng Thương mại Cổ phần Công thương Việt Nam Chi nhánh Hai Bà Trưng, Hà Nội
Thiết kế: Thạc Cường
In tại: Công ty TNHH In Quang Minh
Địa chỉ: Số 27, Ngõ 785 Trương Định, P. Hoàng Mai, TP Hà Nội.

Ảnh bìa 1: Việt Nam đang nỗ lực chuyển đổi từ các phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch sang phương tiện đường bộ chạy điện để đáp ứng cam kết tại COP26 hướng tới phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050. Ảnh: AI

Giá 75.000 đồng

QUẢN LÝ NGÀNH

HUY THẢO 8 Đồng bộ pháp luật về nhà ở và kinh doanh bất động sản
PGS.TS NGUYỄN HỒNG TIẾN 12 Quản lý rủi ro bảo đảm cấp nước an toàn theo hướng tiếp cận hệ thống

PHÁP LUẬT XÂY DỰNG

LS VŨ LÊ BẰNG, LS TRẦN ANH MINH 16 Quyết định số 1040/QĐ-BXD: Bước tiến mới trong chuẩn hóa hợp đồng xây dựng

TỪ CHÍNH SÁCH ĐẾN CUỘC SỐNG

THANH NGA 20 Triển khai trạm sạc xe điện từ thiết kế đến vận hành
PGS.TS TẠ TUẤN HƯNG 22 An toàn trụ sạc, trạm sạc xe điện trong QCVN 32:2026/BCT
PGS.TS NGUYỄN VĂN NGHĨA 24 Thiết kế trạm sạc xe điện cần tính từ cấp điện đến mặt bằng
TRẦN DUY TÀI 26 Trụ sạc đã được thử nghiệm, vì sao vẫn cần kiểm tra sau lắp đặt?
TRẦN ĐỨC TÙNG 28 Đo đúng điện năng để tính đúng tiền sạc xe điện
PGS.TS LÊ VĂN NGHĨA 30 Dùng điện mặt trời cho trạm sạc xe điện
KTS PHẠM THANH TÙNG 32 Vai trò của kiến trúc trong giữ gìn bản sắc
TS.KTS NGUYỄN TẤT THẮNG, THS ĐỖ LÊ TÂN 36 Phát triển không gian đô thị 3D tại Hà Nội: Từ thể chế đến cơ chế bồi thường và quy hoạch tích hợp
THS LÊ TÙNG LÂM 40 BIM và khả năng tái sinh công trình xây dựng

TRÒ CHUYỆN VỚI CHUYÊN GIA

PGS.TS.KTS HOÀNG MẠNH NGUYÊN 42 Chuyển dịch từ tư duy "công trình xanh" sang "chuỗi giá trị xây dựng xanh"

GÓC NHÌN TỪ THỰC TIỄN

NGUYỄN HOÀNG LINH 48 Phép thử lớn mang tên Mường Thanh!

DOANH NGHIỆP 4.0

BẢO CHÂU 50 Hiện đại hóa đào tạo, nâng chất lượng nguồn nhân lực hàng hải
YÊN THƯ 52 Công nghệ xây dựng lắp ghép: Đào tạo nhân lực phải đi trước một bước

GIỚI THIỆU SÁCH MỚI

AN NHIÊN 54 Khi nào có thể mở lại đường sau sạt lở?

NGHIÊN CỨU KHOA HỌC

TS TRẦN MAI ANH, TS ĐỖ XUÂN SƠN, THS NGUYỄN THANH XUÂN YẾN 55 Từ khái niệm hóa đến chỉ báo: Khung kiểm tra tính nhất quán trong đánh giá chất lượng không gian ở môi trường cư trú
TRẦN XUÂN HIẾU, NGÔ THIỆN TOÀN 60 Điều chỉnh lại đất đai trong tái cấu trúc không gian làng đô thị hóa theo mô hình Micro-center quanh ga đường sắt đô thị: Trường hợp ga Chùa Hà, Hà Nội
ĐINH BÌNH PHƯƠNG MINH, LÊ ANH ĐỨC, PHẠM NGỌC TUẤN 64 Chiến lược phát triển không gian đô thị logistics Bình Khánh, Cần Giờ: Tham chiếu mô hình "Chiến lược 10 + X" tại Lingang, Thượng Hải (Trung Quốc)
TS TRẦN THỊ QUỲNH NHƯ, THS HÀ THỊ TRÚC LAN 68 Kết nối hạ tầng giao thông phát triển kinh tế biển Khánh Hòa và Đắk Lắk: Thực trạng và hàm ý quy hoạch
TS.KTS TRẦN QUÝ DƯƠNG 72 Lựa chọn vị trí trung tâm mới trong cấu trúc đô thị đa trung tâm: Khung tiêu chí đề xuất cho đô thị loại I và II vùng Đồng bằng sông Hồng
TS.KTS LÊ ĐÀM NGỌC TÚ, THS.KTS TRẦN THANH QUÝ 79 Hành lang di sản Đông - Tây trong định hướng phát triển xanh và bền vững tỉnh Đắk Lắk
THS.NCS PHẠM VƯƠNG BẢO 84 Tái cấu trúc mạng lưới tuyến xe buýt TP Hồ Chí Minh sau hợp nhất gắn với phát triển hệ thống bến bãi
THS.KTS TRẦN NGỌC THANH TRANG 89 Mô hình tổ chức không gian kiến trúc bảo tàng theo xu hướng tăng cường hoạt động trải nghiệm tương tác
NGÔ HUYỀN TRÂM 94 Doanh trại quân đội tích hợp chức năng phòng thủ dân sự: Kinh nghiệm quốc tế và những bài học
THS.KTS LÊ ANH TÚ, TS.KTS NGUYỄN SONG HOÀN NGUYÊN 98 Giải pháp kiến trúc nhà ở khu vực Kinh thành Huế trong điều kiện phát triển đô thị di sản
THS.KTS NGUYỄN HỮU LỘC 104 Phương pháp xác định giao tuyến mái dạng đa giác phẳng - nghiêng đều và đề xuất ứng dụng trong giảng dạy kiến trúc
PHAN THỊ DIỆU HẰNG, LÊ QUÂN, NGUYỄN THỊ HẠNH NGUYÊN 108 Nhận diện hệ thống di sản kiến trúc đô thị tại Cực phát triển Quy Nhơn (Hành lang liên kết tổng hợp Đông Tây) tỉnh Gia Lai
THS.KTS TRẦN LÊ VĨNH TRÀ, PGS.TS.KTS LÊ THỊ HỒNG NA, THS.KTS NGUYỄN DƯƠNG TỬ 114 Đặc trưng kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long: Nhận diện hình thái, tổ chức không gian và ngôn ngữ biểu tượng
THS MẠC VĂN DÂN, THS ĐỖ QUỲNH NGA, TS PHẠM VĂN HIẾU 120 Đề xuất bộ tiêu chí, quy trình kỹ thuật đánh giá tái sử dụng chất nạo vét vùng cửa sông ven biển Việt Nam
THS LÊ THU THỦY 124 Chuyển đổi số: Yêu cầu cơ sở dữ liệu phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê khí nhà kính và tối ưu hóa vận hành thông minh hệ thống thoát nước đô thị





INDUSTRY MANAGEMENT

HUY THAO 8 Harmonizing Laws on Housing and Real estate business

NGUYEN HONG TIEN 12 Risk management for ensuring safe water supply based on a systems approach

CONSTRUCTION LAW

VU LE BANG, TRAN ANH MINH 16 Decision no. 1040/QD-BXD: A new step forward in the standardization of construction contracts

FROM POLICY TO LIFE

THANH NGA 20 Deploying electric vehicle charging stations which from design to operation

TA TUAN HUNG 22 Safety of electric vehicle charging pillars and stations under QCVN 32:2026/BCT

NGUYEN VAN NGHIA 24 Designing an electric vehicle charging station requires considering everything from the power supply to the site layout

TRAN DUY TAI 26 Charging stations have already been tested - why is a post-installation inspection still necessary?

TRAN DUC TUNG 28 Accurately measuring electricity consumption to correctly calculate EV charging costs

LE VAN NGHIA 30 Using solar power for electric vehicle charging stations

PHAM THANH TUNG 32 The role of architecture in preserving identity

NGUYEN TAT THANG, DO LE TAN 36 Developing 3D urban space in Hanoi: From institutional frameworks to compensation mechanisms and integrated planning

LE TUNG LAM 40 BIM and the regenerative potential of construction projects

TALK WITH EXPERTS

HOANG MANH NGUYEN 42 Shifting from a "green building" mindset to a "green construction value chain" perspective

PERSPECTIVE TO PRACTICAL

NGUYEN HOANG LINH 48 The great test known as Muong Thanh!

ENTERPRISE 4.0

BAO CHAU 50 Modernizing training and enhancing the quality of maritime human resources

YEN THU 52 Prefabricated construction technology: Workforce training must stay one step ahead

ABOUT NEW BOOK

AN NHIEN 54 When can the road be reopened following a landslide?

SCIENTIFIC RESEARCH

TRAN MAI ANH, DO XUAN SON, NGUYEN THANH XUAN YEN 55 From conceptualization to indicators: A consistency framework for assessing spatial quality in residential environments

TRAN XUAN HIEU, NGO THIEN TOAN 60 Land readjustment for spatial restructuring of urbanized villages through a station-area Micro-center model: The case of Chua Ha metro station, Hanoi

DINH BINH PHUONG MINH, LE ANH DUC, PHAM NGOC TUAN 64 Spatial development strategy for binh khanh logistics Urban Area, Can Gio: Drawing on the "10 + X" Model of Lingang, Shanghai (China)

TRAN THI QUYNH NHU, HA THI TRUC LAN 68 Transport infrastructure connectivity for marine economic devel-opment in Khanh Hoa and Dak Lak: Current status and planning implications

TRAN QUY DUONG 72 New urban center location selection in polycentric cities: A pro-posed criteria framework for grade-I and grade-II Cities in the Red River Delta

LE DAM NGOC TU, TRAN THANH QUY 79 The East - West heritage corridor in the green and sustainable development orientation of Dak Lak Province

PHAM VUONG BAO 84 Restructuring the post-merger bus route network of Ho Chi Minh City in conjunction with bus facility development

TRAN NGOC THANH TRANG 89 Spatial classification and organisational model of museum architec-ture in the trend of enhanced interactive experience

NGO HUYEN TRAM 94 Organizing the spatial architecture of military barracks integrated with civil protection functions: International experience and lessons learned

LE ANH TU, NGUYEN SONG HOAN NGUYEN 98 Architectural solutions for Housing in the Hue imperial citadel under the context of heritage urban development

NGUYEN HUU LOC 104 A method for determining the intersection lines of uniformly pitched roofs with planar polygonal faces and a proposed applica-tion in architectural education

PHAN THI DIEU HANG, LE QUAN, NGUYEN THI HANH NGUYEN 108 Identifying the urban architectural heritage system of the Quy Nhon growth node the (Integrated East-West development corridor), Gia Lai province

SCIENTIFIC COMMISSION:

Ass.Prof Pham Minh Ha, Ph.D
(Chairman of the Scientific Council)
Ass.Prof Le Trung Thanh, Ph.D
(Permanent Council)
Ass.Prof Vu Ngoc Anh, Ph.D
Prof. Nguyen Viet Anh, Ph.D
Ass.Prof Pham Xuan Duong, Ph.D
Ass.Prof Hoang Ha, Ph.D
Dr. Nguyen Hong Hai
Dr. Le Quang Hung
Ass.Prof Nguyen Van Hung, Ph.D
Dr. Khuat Viet Hung
Ass.Prof, Architect Hoang Vinh Hung
Prof. Pham Huy Khang, Ph.D
Prof, Dr, Architect Doan Minh Khoi
Prof, Dr, Architect Nguyen To Lang
Ass.Prof Nguyen Ngoc Long, Ph.D
Prof. Phan Quang Minh, Ph.D
Dr. Phan Huu Duy Quoc
Ass.Prof Nguyen Thanh Sang, Ph.D
Prof. Pham Cao Thang, Ph.D
Prof. Trinh Minh Thu, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Hong Tien, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Thi Tuyet Trinh, Ph.D
Ass.Prof Hoang Tung, Ph.D
Ass.Prof Tong Tran Tung, Ph.D

EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Thai Binh
DEPUTY-EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Van Huong
Pham Van Dung
Nguyen Thanh Hoa
Ly Ngoc Thanh

OFFICE:
3rd Floor, 308E Minh Khai Street, Tuong Mai Ward, Hanoi, Vietnam
Editorial Board: 024.39740744
Email: banbientap@tapchixaydung.vn
Representative Office in Ho Chi Minh City: 17A Hong Ha, Tan Son Hoa, HCM City.
Publication:
No: 14/GP-BVHTTDL dated April 11, 2025.
ISSN: 2734-9888
TIN: 0100931323
Account: 113000001172
Joint Stock Commercial Bank of Vietnam Industrial and Commercial Branch, Hai Ba Trung, Hanoi
Designed by: Thac Cuong
Printed at Quang Minh Company Limited
Address: No. 27, Alley 785, Truong Dinh Street, Hoang Mai, Hanoi City, Vietnam.

MỤC LỤC CONTENT

11.2026 tapchixaydung.vn

HỘI ĐỒNG KHOA HỌC:
PGS.TS Phạm Minh Hà - Chủ tịch Hội đồng
PGS.TS Lê Trung Thành - Thường trực Hội đồng
PGS.TS Vũ Ngọc Anh - Ủy viên
GS.TS Nguyễn Việt Anh - Ủy viên
PGS.TS Phạm Xuân Dương - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Hà - Ủy viên
TS Nguyễn Hồng Hải - Ủy viên
TS Lê Quang Hùng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Văn Hùng - Ủy viên
TS Khuất Việt Hùng - Ủy viên
PGS.TS.KTS Hoàng Vĩnh Hưng - Ủy viên
GS.TS Phạm Huy Khang - Ủy viên
GS.TS.KTS Doãn Minh Khôi - Ủy viên
GS.TS.KTS Nguyễn Tố Lăng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Ngọc Long - Ủy viên
GS.TS Phan Quang Minh - Ủy viên
TS Phan Hữu Duy Quốc - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thanh Sang - Ủy viên
GS.TS Phạm Cao Thăng - Ủy viên
GS.TS Trịnh Minh Thụ - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Hồng Tiến - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thị Tuyết Trinh - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Tùng - Ủy viên
PGS.TS Tống Trần Tùng - Ủy viên

TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Thái Bình
PHÓ TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Văn Hường
Phạm Văn Dùng
Nguyễn Thanh Hoa
Lý Ngọc Thanh

VŨ HOÀNG ĐIỆP, ĐINH THỊ THU HOÀI — 130 — Đề xuất khung lựa chọn tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ khu vực chức năng khi xác định cao độ xây dựng trong quy hoạch đô thị

TS PHẠM NGỌC CHÍNH — 134 — Quản lý chất lượng cấp nước hướng tới uống nước trực tiếp tại vòi: Thách thức và đề xuất giải pháp

NGUYỄN ANH TUẤN, TRẦN VŨ VĂN HÒA, NGUYỄN DUY HƯNG, NGUYỄN TRỌNG TÂM, PHẠM THỊ ANH, MAI THỊ HẢI HÀ, VŨ THỊ HOÀI THU — 138 — So sánh bảy mô hình học máy trong lập bản đồ nguy cơ ngập lụt tỉnh Hà Tĩnh dưới kiểm định chéo theo không gian

THS.NCS NGUYỄN THÁI KHANH, TS NGUYỄN HUY NGHĨA, GS.TS TRẦN THẾ TRUYỀN, TS PHẠM VĂN HÙNG — 142 — Ảnh hưởng của tiết diện trống trong giai đoạn khai thác đến tỷ lệ chắn trong thiết kế mặt cắt hầm TBM đường sắt tốc độ cao

THS NGUYỄN TUẤN KIỆT, TS NGÔ QUANG DỰ, TS VŨ VĂN KHOÁT — 146 — Nghiên cứu đánh giá khả năng chịu tải chất ô nhiễm của môi trường nước mặt tại sông Luộc đoạn qua tỉnh Hưng Yên phục vụ quản lý chất lượng tài nguyên nước

THS.NCS NGUYỄN QUỐC BẢO, TS BÙI NGỌC HƯNG, TS TRẦN NGỌC HUY, PGS.TS NGUYỄN QUANG PHÚC, KS TRỊNH VIỆT HOÀNG — 150 — Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế phù hợp khi gia cường lớp móng trong kết cấu áo đường mềm bằng lưới địa kỹ thuật

KS HÀ QUANG ĐẠT, PGS.TS KHÚC ĐĂNG TÙNG — 157 — Nghiên cứu kiểm soát hình học mặt cắt đầu dầm trước khi hàn liên tục hóa cầu vòm thép dưới tác động của nhiệt độ

TS PHÍ HOÀNG TRÌNH, THS LÊ TRẠCH TRƯỜNG — 162 — Nghiên cứu đặc tính cơ học và dao động tự do của cụm nhíp ôtô bằng phương pháp phần tử hữu hạn

KS TRẦN NGỌC BÁCH, THS PHẠM TRUNG HIẾU, TS TRẦN VIỆT TÂM — 166 — Tính toán khả năng chống chọc thủng của đài cọc bê tông cốt thép bằng mô hình thanh chống-giằng và mô hình mô phỏng số

THS NGUYỄN NGỌC LÂM — 172 — Phân tích phản ứng dao động của dầm chịu hoạt tải di động hai bậc tự do và tải trọng tập trung di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn

HOÀNG TRỌNG LÂM — 176 — Xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn ở Việt Nam: Phân tích cực trị và mô phỏng Monte Carlo

PGS.TS BÙI TRƯỜNG SƠN, THS LÊ TIẾN NGHĨA — 182 — Nghiên cứu đánh giá tải trọng giới hạn của cọc căn cứ hàm số quan hệ tải trọng - Độ lún theo các tiêu chí khác nhau

TS MAI THỊ HẰNG, THS NGUYỄN HUY VỮNG — 188 — Cường độ tính toán của bê tông trong cột liên hợp theo Eurocode 4 thế hệ 2

KS NGUYỄN THỊ NGỌC PHƯƠNG, PGS.TS TRƯƠNG ĐÌNH NHẬT, PGS.TS NGUYỄN HỮU ANH TUẤN, THS LÊ THỊ THÙY LINH — 192 — Xây dựng mô hình tích hợp SAP2000-OAPI và thuật toán đa mục tiêu - áp dụng tối ưu trọng lượng và độ cứng kết cấu mái lưới thép nhịp lớn

THS HỒ THÁI HÙNG, GS.TS NGUYỄN TRUNG VIỆT, PGS.TS NGÔ TRÍ THƯỜNG — 198 — Nghiên cứu ảnh hưởng chiều dài nhịp chính và số lượng tháp đến chiều cao hiệu dụng của tháp cầu dây văng dầm liên hợp

TS HOÀNG BẮC AN — 202 — Đánh giá khả năng chịu lực và độ tin cậy cột bê tông cốt thép ven biển bằng trí tuệ nhân tạo

KS NGUYỄN ĐỖ THẠCH, THS NGUYỄN PHÚC BÌNH AN, THS TRÁC NGUYỄN HẢI NGUYÊN, KS TRẦN QUANG HIỂN — 208 — Cập nhật nhận diện bê tông khối lớn theo TCVN 14334:2025: Phân tích vấn đề, rủi ro và giải pháp

NGUYỄN LÊ MINH THÔNG, NGUYỄN NHỰT DUY, NGUYỄN QUỐC HUY, NGUYỄN ĐỨC TIẾN, VŨ HỒ NAM — 214 — Bất định do mô hình hóa sàn CLT trong đáp ứng gió của nhà cao tầng khung-giằng thép

TS LÊ TRUNG KIÊN, TS NGÔ VIỆT DŨNG — 221 — Xác định hệ số chiều dài tính toán của cột trong khung thép một tầng có dầm xiên và chuyển vị ngang

TRẦN ANH ĐỨC, TRẦN TRUNG HIẾU, TRƯƠNG VIỆT HÙNG — 226 — Nghiên cứu đáp ứng động đất của khung thép bằng phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian

ĐỖ TRỌNG THÀNH, TỐNG TÔN KIÊN, LÊ VIỆT DŨNG — 233 — Mô phỏng ảnh hưởng của hình dáng kích thước mẫu và hàm lượng cát nghiền thay thế cát tự nhiên đến cường độ chịu nén của bê tông bằng mô hình MSEL mở rộng

TS LÊ HOÀI BÃO, TS NGÔ VĂN THỨC — 238 — Đánh giá đặc trưng lý - hóa và tiềm năng sử dụng tro trấu, tro bã mía tại Đồng bằng sông Cửu Long làm phụ gia khoáng

TS ĐÀO PHÚC LÂM, TS ĐỖ NGỌC TƯỚC, KS LÃ MẠNH HẢI, THS PHẠM TRUNG HIẾU, TS TRỊNH THỊ HOA — 242 — Tương tác giữa xi măng và tro xỉ tầng sôi tuần hoàn trong đất đá thải mỏ than gia cố làm móng đường

— 248 — Bê tông geopolymer tro bay-xỉ dưỡng hộ ở nhiệt độ thường: Tổng quan về cường độ và các yếu tố ảnh hưởng

TRẦN ĐẶNG NGỌC KHUÊ, PGS.TS NGUYỄN VĂN TIẾP — 253 — Tích hợp AI và mô hình hệ thống động đánh giá tác động của quy hoạch nhà cao tầng đến giao thông đô thị

THS CÙ THỊ THỤC ANH, TS VƯƠNG XUÂN CẦN, THS CAO QUANG KHẢI — 258 — Mối liên hệ giữa nhận thức rủi ro và hành vi vi phạm giao thông khi đi xe máy của sinh viên: Nghiên cứu trường hợp ở Trường Đại học Giao thông vận tải

TS TÀO VĂN CHIẾN — 262 — Đánh giá ảnh hưởng của một số tham giá chuyển hướng đến hao mòn bánh xe toa xe khách

THÁI QUỐC HIỀN, PGS.TS MAI SỸ HÙNG — 266 — Lựa chọn công nghệ và các rủi ro đối với quản lý chất lượng xây dựng cống vùng triều lớn ở Việt Nam

HOÀNG VIỆT ANH, NGUYỄN THỊ THÚY — 270 — Các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại tỉnh Lào Cai

THS.NCS HUỲNH VĂN KHANH, CAO VĂN DUY, NGUYỄN THÁI CHÂU, PGS.TS LÊ TRUNG PHONG — 274 — Cấu trúc và kiểm soát chất lượng dữ liệu mô hình BIM phục vụ đánh giá carbon A1-A3 trong thiết kế





TRAN LE VINH TRA, LE THI HONG NA, NGUYEN DUONG TU	114	Architectural characteristics of Khmer pagodas in Vinh Long: Identifying morphology, spatial organization, and symbolic expres-sion
MAC VAN DAN, DO QUYNH NGA, PHAM VAN HIEU	120	Proposed criteria and technical procedure for assessing the reuse of dredged material from estuarine and coastal areas of Vietnam
LE THU THUY	124	Digital transformation: Database requirements for energy audits, greenhouse gas inventories, and intelligent operational optimiza-tion of urban drainage and sewerage systems
VU HOANG DIEP, DINH THI THU HOAI	130	A proposed framework for selecting design annual exceedance probabilities by functionalarea protection level in determining flood planning levels in urban planning
PHAM NGOC CHINH	134	Drinking water quality management towards safe direct tap water consumption: Challenges and proposed solutions
NGUYEN ANH TUAN, TRAN VU VAN HOA, NGUYEN DUY HUNG, NGUYEN TRONG TAM, PHAM THI ANH, MAI THI HAI HA, VU THI HOAI THU	138	Machine learning for flood susceptibility mapping in Ha Tinh province, Vietnam: A sevenmodel comparison under spatially blocked cross-validation
NGUYEN THAI KHANH, NGUYEN HUY NGHIA, TRAN THE TRUYEN, PHAM VAN HUNG	142	Effect of operational free cross-sectional area on blockage ratio in cross-section design of high-speed rail TBM tunnels
NGUYEN TUAN KIET, NGO QUANG DU, VU VAN KHOAT	146	Research on assessing the assimilative capacity of surface water for pollutants in the luoc river section flowing through hung yen province for water resource quality management
NGUYEN QUOC BAO, BUI NGOC HUNG, TRAN NGOC HUY, NGUYEN QUANG PHUC, TRINH VIET HOANG	150	Research on selection of an appropriate design method for ge-ogrid-reinforced base courses in flexible pavements
HA QUANG DAT, KHUC DANG TUNG	157	Study on geometric control of girder-end cross sections before continuity welding of steel arch bridges under thermal effects
PHI HOANG TRINH, LE TRACH TRUONG	162	Study on the mechanical characteristics and free vibration of an automotive leaf spring assembly using the finite element method
TRAN NGOC BACH, PHẠM TRUNG HIEU, TRAN VIET TAM	166	Punching shear capacity of reinforced concrete pile caps using the strut-and-tie model and numerical simulation
NGUYEN NGOC LAM	172	Analysis of the vibration response of beams subjected to a moving two-degree-of-freedom vehicle load and a moving concentrated load using the finite element method
HOANG TRONG LAM	176	Determination of design wind speed for long-span bridges in Vietnam: Extreme-value analysis and Monte Carlo simulation
BUI TRUONG SON, LE TIEN NGHIA	182	Study on evaluating the ultimate capacity of pile based on load - Settlement relationship function according to different criteria
MAI THI HANG, NGUYEN HUY VUNG	188	Design concrete strength in composite columns under second-generation Eurocode 4
NGUYEN THI NGOC PHUONG, TRUONG DINH NHAT, NGUYEN HUU ANH TUAN, LE THI THUY LINH	192	Integration of SAP2000-OAPI and multi-objective optimization for weight - stiffness tradeoff in large-span steel grid roof structures
HO THAI HUNG, NGUYEN TRUNG VIET, NGO TRI THUONG	198	Effect of main span length and number of pylons on the effective pylon height of composite cable-stayed bridges
HOANG BAC AN	202	Evaluating the Load-Bearing capacity and reliability of coastal RC columns using artificial intelligence
NGUYEN DO THACH, NGUYEN PHUC BINH AN, TRAC NGUYEN HAI NGUYEN, TRAN QUANG HIEN	208	Updating the identification of mass concrete under TCVN 14334:2025: Problems, risks and solutions
NGUYEN LE MINH THONG, NGUYEN NHUT DUY, NGUYEN QUOC HUY, NGUYEN DUC TIEN, VU HO NAM	214	Model-form uncertainty due to CLT floor idealisation in the wind response of a steel bracedframe tall building
LE TRUNG KIEN, NGO VIET DUNG	221	Determination of column effective length factors in sidesway single-story steel frames with inclined rafters
TRAN ANH DUC, TRAN TRUNG HIEU, TRUONG VIET HUNG	226	Seismic response analysis of steel frames using nonlinear time-history analysis
DO TRONG THANH, TONG TON KIEN, LE VIET DUNG	233	Modelling the effects of specimen size/shape and replacement ratio of crushed limestone sand for natural sand and on the com-pressive strength of normal concrete by Extended MSEL model
LE HOAI BAO, NGO VAN THUC	238	Assessment of physicochemical characteristics and potential use of rice husk ash and sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious materials in the Mekong Delta
DAO PHUC LAM, DO NGOC TUOC, LA MANH HAI, PHAM TRUNG HIEU	242	Cement-fluidized bed ash interaction in stabilized coal mine waste rock for road bases
TRINH THI HOA	248	Ambient-Cured fly ash-slag geopolymer concrete: A review of strength and Influencing Factors
TRAN DANG NGOC KHUE, NGUYEN VAN TIEP	253	Integrating Artificial Intelligence and System dynamics to assess the impacts of High-Rise development planning on urban traffic
CU THI THUC ANH, VUONG XUAN CAN, CAO QUANG KHAI	258	Relationship between risk perception and traffic violation behaviors among students riding motorcycles: A case study at the University of Transport and Communications
TAO VAN CHIEN	262	Investigation of the effects of selected bogie parameters on pas-senger coach wheel wear
THAI QUOC HIEN, MAI SY HUNG	266	Technology selection and risks to quality management in the construction of large tidal estuary dams in Vietnam

SCIENTIFIC COMMISSION:

Ass.Prof Pham Minh Ha, Ph.D
(Chairman of the Scientific Council)
Ass.Prof Le Trung Thanh, Ph.D
(Permanent Council)
Ass.Prof Vu Ngoc Anh, Ph.D
Prof. Nguyen Viet Anh, Ph.D
Ass.Prof Pham Xuan Duong, Ph.D
Ass.Prof Hoang Ha, Ph.D
Dr. Nguyen Hong Hai
Dr. Le Quang Hung
Ass.Prof Nguyen Van Hung, Ph.D
Dr. Khuat Viet Hung
Ass.Prof, Architect Hoang Vinh Hung
Prof. Pham Huy Khang, Ph.D
Prof, Dr, Architect Doan Minh Khoi
Prof, Dr, Architect Nguyen To Lang
Ass.Prof Nguyen Ngoc Long, Ph.D
Prof. Phan Quang Minh, Ph.D
Dr. Phan Huu Duy Quoc
Ass.Prof Nguyen Thanh Sang, Ph.D
Prof. Pham Cao Thang, Ph.D
Prof. Trinh Minh Thu, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Hong Tien, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Thi Tuyet Trinh, Ph.D
Ass.Prof Hoang Tung, Ph.D
Ass.Prof Tong Tran Tung, Ph.D

EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Thai Binh
DEPUTY-EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Van Huong
Pham Van Dung
Nguyen Thanh Hoa
Ly Ngoc Thanh

MỤC LỤC CONTENT

11.2026 tapchixaydung.vn

HỘI ĐỒNG KHOA HỌC:
PGS.TS Phạm Minh Hà - Chủ tịch Hội đồng
PGS.TS Lê Trung Thành - Thường trực Hội đồng
PGS.TS Vũ Ngọc Anh - Ủy viên
GS.TS Nguyễn Việt Anh - Ủy viên
PGS.TS Phạm Xuân Dương - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Hà - Ủy viên
TS Nguyễn Hồng Hải - Ủy viên
TS Lê Quang Hùng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Văn Hùng - Ủy viên
TS Khuất Việt Hùng - Ủy viên
PGS.TS.KTS Hoàng Vĩnh Hưng - Ủy viên
GS.TS Phạm Huy Khang - Ủy viên
GS.TS.KTS Doãn Minh Khôi - Ủy viên
GS.TS.KTS Nguyễn Tố Lăng - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Ngọc Long - Ủy viên
GS.TS Phan Quang Minh - Ủy viên
TS Phan Hữu Duy Quốc - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thanh Sang - Ủy viên
GS.TS Phạm Cao Thăng - Ủy viên
GS.TS Trịnh Minh Thụ - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Hồng Tiến - Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thị Tuyết Trinh - Ủy viên
PGS.TS Hoàng Tùng - Ủy viên
PGS.TS Tống Trần Tùng - Ủy viên

TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Thái Bình
PHÓ TỔNG BIÊN TẬP:
Nguyễn Văn Hường
Phạm Văn Dùng
Nguyễn Thanh Hoa
Lý Ngọc Thanh

PHẠM VĂN VƯỢNG, PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG, PGS.TS LÊ SƠN TÙNG — 278 — Số hóa quy trình khai thác cảng container trong xu thế tự động hóa và cảng thông minh: Tổng quan nghiên cứu và khoảng trống nghiên cứu

THS.NCS TRẦN MỸ HẢO, TS NGUYỄN VĂN KHÁNH — 282 — Nghiên cứu ứng dụng Hệ thống Quản lý không gian Cấp xã (LSMS) trong chuyển đổi số và nâng cao hiệu quả quản trị đô thị địa phương

PGS.TS HOÀNG QUỐC LONG, PHẠM HỒNG THẮM, TRẦN THỊ HƯƠNG GIANG, TRƯƠNG LÊ NGÂN HÀ, VŨ TRIỆU NGHĨA, NCS PHẠM NGỌC VIỆT, THS.NCS TRẦN VĂN HIẾU, TS VŨ MINH TÂM — 286 — Nghiên cứu hệ thống Webapp quản lý vận tải hàng hóa tích hợp chứng từ giao hàng điện tử trong doanh nghiệp logistics

TS NGUYỄN ĐỨC TÂM, THS NGUYỄN ĐỨC LÂM THS NGUYỄN HỮU ANH — 290 — Thấu hiểu khách hàng dựa trên trí tuệ nhân tạo và đổi mới marketing trong doanh nghiệp xây dựng

TS PHẠM THỊ LÝ, TS NGUYỄN XUÂN LONG — 294 — Nghiên cứu ứng dụng thị giác máy và trí tuệ nhân tạo cho hệ thống tự động phân loại chất lượng ngoại quan của quả cà chua

THS PHẠM THỊ HỒNG ANH — 299 — Nghiên cứu ứng dụng công nghệ xử lý ảnh và cánh tay robot trong phân loại sản phẩm

THS.NCS LÊ THÀNH TIẾN, PGS.TS NGUYỄN ĐÌNH THẠCH, TS PHẠM NAM THANH — 304 — Điều khiển chuyển động tàu mặt nước tự hành dưới nhiễu môi trường: Tổng quan và xu hướng điều khiển lai

TS LÊ KIM THƯ — 309 — Nghiên cứu khôi phục biên dạng bề mặt bằng kính hiển vi số digital holographic ngoài trục phản xạ

NGÔ THANH THỦY, HUỲNH XUÂN TÍN — 314 — Phân tích vai trò của các thành phần triển khai BIM theo vòng đời của dự án đường sắt đô thị tại Việt Nam

NGUYỄN MINH THIỆN, TRẦN VŨ TỰ — 319 — So sánh đặc trưng dòng người thoát hiểm tại hành lang và cầu thang trong chung cư mini

DƯƠNG TẤT THẮNG, TRẦN VĂN TOẢN NGUYỄN MẠNH TRƯỜNG — 324 — Tổ chức và quản lý thông tin công trình xây dựng giai đoạn thiết kế kỹ thuật và thiết kế bản vẽ thi công trên nền tảng BIM

THS PHẠM PHƯƠNG NAM, THS HUỲNH NGỌC VÂN, THS HUỲNH THỊ ÁNH TUYẾT — 329 — Nghiên cứu tổ chức làn ưu tiên cho xe buýt kết nối với hệ thống metro tại TP Hồ Chí Minh

BÙI VĂN TUYÊN — 334 — Tối ưu hóa điều phối nguồn lực chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng: Đánh giá hiệu quả các phương pháp trong bài toán vận tải tuyến tính

TS PHẠM ĐĂNG KHOA — 338 — Nghiên cứu hệ thống quản lý an toàn và vệ sinh lao động trong xây dựng tại Việt Nam

PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI, THS PHẠM THÚY HƯỜNG — 342 — Thu hút khu vực tư nhân đầu tư TOD gắn với đường sắt đô thị: Kinh nghiệm quốc tế và hàm ý chính sách cho Việt Nam

NGUYỄN THỊ THỦY, PGS.TS LÊ VĂN CHÍNH, PGS.TS NGUYỄN QUỐC TOẢN — 346 — Nhân tố ảnh hưởng tới công tác quản lý đấu thầu trong dự án đầu tư xây dựng công trình thủy lợi: Tổng quan hệ thống kết hợp trắc lượng thư mục

TS MAI BÁ LĨNH — 350 — Nghiên cứu đề xuất giải pháp thích ứng cho ngành vận tải, logistics Việt Nam trong bối cảnh biến động môi trường quốc tế hiện nay

THS.NCS TRẦN MINH ĐỨC, PGS.TS. NGUYỄN LƯƠNG HẢI — 354 — Nghiên cứu các yếu tố rủi ro liên quan đến đơn vị tư vấn trong các dự án đầu tư xây dựng công trình giao thông sử dụng vốn đầu tư công tại Việt Nam

TS NGUYỄN THỊ HẠNH, THS PHẠM CAO CƯỜNG — 358 — Hoàn thiện quản trị rủi ro tín dụng tại Ngân hàng Chính sách xã hội tỉnh Lào Cai

TS NGÔ ĐỨC PHƯỚC — 362 — Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam

CN NGÔ MINH HIẾU, TS LÊ TRỌNG TÙNG — 366 — Ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình: Nghiên cứu điển hình tại Công ty Cổ phần Chương Dương

HỒ KHẮC QUANG, THS NGUYỄN THẾ PHONG, THS NGUYỄN ĐỨC THUẬN — 370 — Các nhóm yếu tố liên quan đến công tác kiểm soát chất lượng thi công nhà ở cao tầng: Khảo sát chuyên gia và đề xuất thứ tự ưu tiên giải pháp

THS BÙI THỊ THÙY LINH, TS NGUYỄN MINH ĐỨC — 374 — Phân loại cảng thủy nội địa phục vụ định hướng chính sách chuyển đổi xanh tại Việt Nam

KS HUỲNH TẤN ĐIỆN, PGS.TS LƯU TRƯỜNG VĂN — 379 — Phát triển khung SWITCH đánh giá các rào cản thực hiện ESG tại các Ban quản lý dự án xây dựng ở các tỉnh phía Nam: Nghiên cứu Delphi

TS THÂN TRỌNG TRẦN HOAN, THS PHẠM TRƯỜNG GIANG, THS PHẠM TRƯỜNG VŨ, THS NGUYỄN DUY CƯỜNG, THS BÙI MINH NGỌC TRUNG — 384 — Định giá dự án BOT hạ tầng đang vận hành: Nghiên cứu trường hợp dự án BOT cầu Cổ Chiên

HOÀNG DUY LONG, NGUYỄN QUỐC TOẢN — 389 — Vai trò của giám sát, đánh giá đầu tư trong quản lý huy động vốn phát triển hạ tầng đô thị tỉnh Lạng Sơn

THS NGUYỄN HỮU VƯƠNG — 394 — Ứng dụng AI tạo sinh trong giảng dạy và đào tạo ngành Quản lý xây dựng

NGUYỄN THẢO TRANG, NGUYỄN THỊ THÚY — 397 — Các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án bất động sản xanh tại Hà Nội

NGUYỄN HOÀNH — 402 — Lập kế hoạch thi công takt cho công tác hoàn thiện và cơ điện căn hộ nhà chung cư cao tầng tại Việt Nam, so sánh trước cho tòa C1 Fhome+ Hưng Lộc

NGUYỄN SỸ HÙNG, NGUYỄN NHẬT ĐỨC ANH, NGUYỄN TRỌNG NGHĨA — 408 — Mô hình vật lý hai chiều tường chắn đất có cốt sử dụng vật liệu tương tự Schneebeli

MAI HẢI GIANG, LÊ TRUNG PHONG, NGUYỄN TRỌNG TƯ, NGUYỄN VĂN NGHĨA — 414 — Hoàn thiện công tác quản lý đầu tư xây dựng công trình năng lượng tái tạo theo Nghị định số 272/2026/NĐ-CP: Nghiên cứu trường hợp tỉnh Cà Mau hướng tới mục tiêu giảm phát thải carbon





HOANG VIET ANH, NGUYEN THI THUY	270	Factors affecting the construction management in Lao Cai province
HUYNH VAN KHANH, CAO VAN DUY, NGUYEN THAI CHAU, LE TRUNG PHONG	274	Structuring and quality control of BIM model data for A1-A3 carbon assessment during design
PHAM VAN VUONG, DANG CONG XUONG, LE SON TUNG	278	Digitalization of container port operational processes amid automa-tion and smart port development: A review of current research and research gaps
TRAN MY HAO, NGUYEN VAN KHANH	282	Application of Local Spatial Management System (LSMS) for Digital Transformation and Local Urban Governance Improvement
HOANG QUOC LONG, PHAM HONG THAM, TRAN THI HUONG GIANG, TRUONG LE NGAN HA, VU TRIEU NGHIA, PHAM NGOC VIET, TRAN VAN HIEU, VU MINH TAM	286	Research on a freight transportation management Webapp system integrated with ePOD in logistics enterprises
NGUYEN DUC TAM, NGUYEN DUC LAM, NGUYEN HUU ANH	290	AI-driven customer insight and marketing innovation in construc-tion firms
PHAM THI LY, NGUYEN XUAN LONG	294	Research on the application of machine vision and artificial intelli-gence to an automated system for classifying the external quality of tomatoes
PHAM THI HONG ANH	299	Research on the application of image processing technology and robotic arm in product sorting
LE THANH TIEN, NGUYEN DINH THACH, PHAM NAM THANH	304	Motion control of unmanned surface vehicles under environmental disturbances: A review and hybrid control trends
LE KIM THU	309	Research on surface profile reconstruction using an off-axis reflec-tive digital holographic microscope
NGO THANH THUY, HUYNH XUAN TIN	314	Lifecycle-oriented analysis of BIM implementation components for urban railway projects in Vietnam
NGUYEN MINH THIEN, TRAN VU TU	319	Comparison of evacuation flow characteristics in corridors and stairways of miniapartment building
DUONG TAT THANG, TRAN VAN TOAN, NGUYEN MANH TRUONG	324	Organization and management of construction information during technical and construction drawing design using BIM
PHAM PHƯƠNG NAM, HUYNH NGOC VAN, HUYNH THI ANH TUYET	329	Study on priority bus lane organization for integration with the metro system in Ho Chi Minh City
BUI VAN TUYEN	334	Optimizing resource allocation in construction material supply chains: An efficiency evaluation of linear transportation problem methods
PHAM DANG KHOA	338	Investigation of construction safety and health management system in Viet Nam
NGUYEN HONG THAI, PHAM THUY HUONG	342	Attracting private sector investment in transit-oriented develop-ment (TOD) around urban rail: International experience and policy implications for Vietnam
NGUYEN THI THUY, LE VAN CHINH, NGUYEN QUOC TOAN	346	Factors affecting tendering management in hydraulic works construction investment projects: A systematic review combined with bibliometric analysis
MAI BA LINH	350	Research on adaptation solutions for vietnam's transportation and logistics industry in the context of current international environ-mental changes
TRAN MINH DUC, NGUYEN LUONG HAI	354	A study of risk factors associated with consulting firms in transport infrastructure construction projects using public investment funds in Vietnam
NGUYEN THI HANH, PHAM CAO CUONG	358	Credit risk management at the Vietnam Bank for Social Policies in Lao Cai Province
NGO DUC PHUOC	362	A study of factors affecting the effectiveness of road - air transport connectivity for air cargo in Vietnam
NGO MINH HIEU, LE TRONG TUNG	366	The impact of risks on construction cost escalation: A case study of Chuong Duong Joint Stock Company
HO KHAC QUANG, NGUYEN THE PHONG, NGUYEN DUC THUAN	370	Factors associated with construction quality control in high-rise residential projects: An expert survey and prioritized improvement measures
BUI THI THUY LINH, NGUYEN MINH DUC	374	Classification of inland waterway ports to guide green transition policies in Vietnam
HUYNH TAN DIEN, LUU TRUONG VAN	379	Developing a SWITCH-Based Framework for assessing barriers to ESG Implementation in construction project management units in Southern Vietnam: A Delphi Study
THAN TRONG TRAN HOAN, PHAM TRUONG GIANG, PHAM TRUONG VU, NGUYEN DUY CUONG, BUI MINH NGOC TRUNG	384	Valuation of an operational infrastructure BOT project: A case study of the Co Chien bridge bot project
HOANG DUY LONG, NGUYEN QUOC TOAN	389	The role of investment monitoring and evaluation in managing capital mobilization for urban infrastructure development in Lang Son Province
NGUYEN HUU VUONG	394	Applying generative AI in teaching and training for the Construc-tion Management field
NGUYEN THAO TRANG, NGUYEN THI THUY	397	Factors influencing capital mobilization for green real estate pro-jects in Hanoi
NGUYEN HOANH	402	Takt planning for apartment fit out and MEP works in Vietnamese high rise housing, an ex ante comparison for Fhome+ Hung Loc Tower C1
NGUYEN SY HUNG, NGUYEN NHAT DUC ANH, NGUYEN TRONG NGHIA	408	Two-Dimensional physical modelling of a reinforced soil retaining wall using Schneebeli analogue material
MAI HAI GIANG, LE TRUNG PHONG, NGUYEN TRONG TU, NGUYEN VAN NGHIA	414	Improving construction investment management for renewable energy facilities under Decree No. 272/2026/ND-CP: A case study of Ca Mau Province toward carbon emission reduction

SCIENTIFIC COMMISSION:

Ass.Prof Pham Minh Ha, Ph.D
(Chairman of the Scientific Council)
Ass.Prof Le Trung Thanh, Ph.D
(Permanent Council)
Ass.Prof Vu Ngoc Anh, Ph.D
Prof. Nguyen Viet Anh, Ph.D
Ass.Prof Pham Xuan Duong, Ph.D
Ass.Prof Hoang Ha, Ph.D
Dr. Nguyen Hong Hai
Dr. Le Quang Hung
Ass.Prof Nguyen Van Hung, Ph.D
Dr. Khuat Viet Hung
Ass.Prof, Architect Hoang Vinh Hung
Prof. Pham Huy Khang, Ph.D
Prof, Dr, Architect Doan Minh Khoi
Prof, Dr, Architect Nguyen To Lang
Ass.Prof Nguyen Ngoc Long, Ph.D
Prof. Phan Quang Minh, Ph.D
Dr. Phan Huu Duy Quoc
Ass.Prof Nguyen Thanh Sang, Ph.D
Prof. Pham Cao Thang, Ph.D
Prof. Trinh Minh Thu, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Hong Tien, Ph.D
Ass.Prof Nguyen Thi Tuyet Trinh, Ph.D
Ass.Prof Hoang Tung, Ph.D
Ass.Prof Tong Tran Tung, Ph.D

EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Thai Binh
DEPUTY-EDITOR-IN-CHIEF:
Nguyen Van Huong
Pham Van Dung
Nguyen Thanh Hoa
Ly Ngoc Thanh

Đồng bộ pháp luật về nhà ở và kinh doanh bất động sản



HUY THẢO

Việc sửa đổi đồng thời Luật Nhà ở và Luật Kinh doanh BĐS có ý nghĩa quan trọng trong việc xử lý những quy định còn chồng chéo, tạo sự thống nhất giữa chính sách phát triển nhà ở với hoạt động đầu tư, kinh doanh BĐS. Đây là cơ sở để nâng cao hiệu quả quản lý nhà nước và thúc đẩy thị trường BĐS phát triển ổn định, lành mạnh hơn.

Tại Kỳ họp thứ 2 Quốc hội khóa XVI, hai dự án Luật Nhà ở (sửa đổi) và Luật Kinh doanh BĐS (sửa đổi) được xem xét, thảo luận. Khi được thông qua, các luật mới sẽ góp phần tháo gỡ những vướng mắc trong phát triển nhà ở, hoạt động kinh doanh BĐS, đơn giản hóa thủ tục hành chính và phân định rõ thẩm quyền quản lý, qua đó tạo môi trường pháp lý thống nhất, minh bạch hơn cho thị trường.

HOÀN THIỆN KHUNG PHÁP LÝ TỪ YÊU CẦU THỰC TIỄN

Luật Nhà ở năm 2023 và Luật Kinh doanh BĐS năm 2023 đã tạo cơ sở pháp lý cho hoạt động phát triển, quản lý nhà ở và kinh doanh BĐS. Tuy nhiên, quá trình thực hiện cho thấy một số quy định chưa theo kịp yêu cầu thực tiễn, còn chồng chéo với pháp luật về đất đai, đầu tư, xây dựng, dân sự và các lĩnh vực liên quan. Những bất cập này đặt ra yêu cầu rà soát, sửa đổi toàn diện hai luật, bảo đảm sự thống nhất trong hệ thống pháp luật.

Ngày 16/10/2026, Chính phủ đã có Tờ trình số 923/TTr-CP về dự thảo Luật Nhà ở (sửa đổi) và Tờ trình số 927/TTr-CP về dự thảo Luật Kinh doanh BĐS (sửa đổi) báo cáo Quốc hội. Cả hai dự án luật đều được xây dựng theo hướng thay thế các luật hiện hành, thay vì chỉ sửa đổi một số điều khoản riêng lẻ. Tại Kỳ họp thứ 2 Quốc hội khóa XVI, Bộ trưởng Bộ Xây dựng Trần Hồng Minh đã trình bày Tờ trình về hai dự án luật này để Quốc hội xem xét, thảo luận.

Đối với Luật Nhà ở, yêu cầu sửa đổi xuất phát từ những bất cập trong phát triển các loại hình nhà ở, chính sách nhà ở xã hội (NƠXH), nhà ở cho thuê, quản lý, sử dụng nhà chung cư và cải tạo, xây dựng lại nhà chung cư. Một số quy định về đầu tư, huy động nguồn lực, giao dịch và quản lý nhà ở cũng cần được điều chỉnh để phù hợp với hệ thống pháp luật mới, nhất là trong bối cảnh tổ chức chính quyền địa phương theo mô hình hai cấp.

Trong khi đó, Luật Kinh doanh BĐS cần được rà soát để xử lý những vướng mắc về điều kiện đưa BĐS vào kinh doanh, chuyển nhượng dự án, hợp đồng giao dịch, thủ tục hành chính và hoạt động kinh doanh dịch vụ BĐS. Các quy định về phân định thẩm quyền cũng cần được điều chỉnh cho phù hợp với mô hình chính quyền địa phương hai cấp, tránh chồng chéo trong quá trình thực hiện.

Việc sửa đổi hai luật còn gắn với yêu cầu rà soát các quy định có liên quan, không chỉ giải quyết những vấn đề riêng của từng lĩnh vực. Các chính sách về nhà ở và kinh doanh BĐS cần thống nhất với pháp luật đất đai, đầu tư, xây dựng, bảo vệ quyền lợi người tiêu dùng và các quy định về giao dịch, tài sản. Đây cũng là yêu cầu được đặt ra tại Nghị quyết số 21-NQ/TW ngày 28/7/2026 về quan điểm, định hướng sửa đổi Luật Đất đai và các luật có liên quan.

Theo Bộ trưởng Trần Hồng Minh, các đại biểu Quốc hội nhất trí cao với việc sửa đổi, bổ sung Luật Nhà ở năm 2023. Việc sửa đổi nhằm kịp thời thể chế hóa các chủ trương, định hướng mới, đồng thời tháo gỡ những khó khăn, vướng mắc phát sinh trong quá trình thực hiện.



Tại Kỳ họp thứ 2 Quốc hội khóa XVI, Bộ trưởng Bộ Xây dựng Trần Hồng Minh đã trình bày Tờ trình về hai dự án luật này để Quốc hội xem xét, thảo luận.

Đối với dự án Luật Kinh doanh BĐS (sửa đổi), các đại biểu Quốc hội cũng nhất trí cao về sự cần thiết sửa đổi toàn diện luật này, đồng thời với Luật Đất đai và Luật Nhà ở. Việc rà soát, hoàn thiện các quy định cần bảo đảm sự thống nhất giữa các luật, tạo cơ sở pháp lý rõ ràng hơn cho hoạt động đầu tư, kinh doanh và quản lý thị trường BĐS.

Phó Chủ tịch Quốc hội Nguyễn Khắc Định đánh giá, việc sửa đổi toàn diện Luật Nhà ở và Luật Kinh doanh BĐS là cần thiết. Quá trình hoàn thiện cần tiếp tục rà soát để bảo đảm đồng bộ với các luật về đất đai, đầu tư, Bộ luật Dân sự, quy hoạch, quy hoạch đô thị và nông thôn, xây dựng; đồng thời nghiên cứu cách quy định đối với nội dung phát triển nhà ở thương mại để tránh phân tán, chồng lấn giữa các luật.

CHÍNH SÁCH NHÀ Ở HƯỚNG MẠNH HƠN VÀO NHU CẦU THỰC TẾ

Dự thảo Luật Nhà ở (sửa đổi) gồm 13 chương, 130 điều, kế thừa những quy định còn phù hợp của Luật Nhà ở năm 2023, đồng thời bổ sung, điều chỉnh nhiều nội dung. Một trong những định hướng đáng chú ý là xác định rõ hơn các loại hình nhà ở và chính sách tương ứng, trong đó ưu tiên phát triển nhà ở cho thuê.

Theo dự thảo, 4 loại hình nhà ở gồm: Nhà ở thương mại, nhà ở cho thuê, nhà ở công vụ và nhà ở chính sách. Việc dành một chương riêng quy định về nhà ở cho thuê cho thấy định hướng mở rộng loại hình này, tạo thêm lựa chọn chỗ ở cho người dân, nhất là tại đô thị, khu công nghiệp, khu công nghệ cao, khu chế xuất và những khu vực tập trung đông dân cư.

Dự thảo quy định nhà ở cho thuê được đầu tư bằng vốn nhà nước và không bằng vốn nhà nước, đồng thời bao gồm nhà lưu trú công nhân trong khu công nghiệp. Đối tượng được thuê là công dân Việt Nam có khó khăn về nhà ở hoặc có nhu cầu thuê nhà; việc xét ưu tiên được thực hiện đối với những nhóm có hoàn cảnh khó khăn. Các nội dung về đất phát triển dự án, chủ đầu tư, chính sách ưu đãi, giá thuê, quản lý và vận hành nhà ở cho thuê cũng được quy định cụ thể.

Đáng chú ý, dự thảo giao UBND cấp tỉnh quyết định tỷ lệ phát triển nhà ở cho thuê trong các dự án đầu tư xây dựng nhà ở thương mại. Việc thực hiện có thể thông qua dành một phần diện tích đất ở trong dự án, bố trí quỹ đất ở vị trí khác ngoài phạm vi dự án hoặc nộp tiền tương đương. UBND cấp tỉnh cũng được giao quyết định đối tượng ưu tiên thuê, loại hình nhà ở cho thuê, giá thuê đối với nhà ở đầu tư bằng vốn nhà nước và các cơ chế hỗ trợ phù hợp với điều kiện địa phương...

Nếu được thông qua, những quy định này sẽ bổ sung cơ sở pháp lý để các địa phương chủ động hơn trong việc phát triển nhà ở cho thuê, đồng thời khuyến khích doanh nghiệp và các thành phần kinh tế tham gia đầu tư. Qua đó, nguồn cung nhà ở có thể được đa dạng hóa, đáp ứng tốt hơn nhu cầu thuê nhà của người dân, thay vì chủ yếu tập trung vào phân khúc nhà ở để bán.

Đối với NƠXH và nhà ở cho lực lượng vũ trang nhân



Việc bổ sung mã định danh điện tử và quy định công khai thông tin dự án, hợp đồng giao dịch được kỳ vọng giúp người dân, doanh nghiệp thuận lợi hơn khi tìm kiếm, tiếp cận thông tin, đồng thời hỗ trợ cơ quan quản lý theo dõi, giám sát thị trường.

dân, dự thảo luật hóa một số chính sách thí điểm đã được triển khai theo Nghị quyết số 201/2025/QH15 của Quốc hội và Nghị quyết số 66.15/2025/NQ-CP của Chính phủ. Các nội dung được đề cập gồm điều kiện về nhà ở để hưởng chính sách hỗ trợ NƠXH; quy hoạch, lựa chọn chủ đầu tư; xác định giá bán, giá thuê mua; thủ tục đầu tư xây dựng dự án; tạo quỹ đất và phát triển hạ tầng kỹ thuật. Một số quy định về đối tượng được mua, thuê mua NƠXH không phải bốc thăm và không phải đáp ứng điều kiện về nhà ở, thu nhập theo quy định cũng được đưa vào dự thảo.

Ngoài ra, dự thảo điều chỉnh chính sách đối với nhà ở thương mại, nhà ở công vụ và nhà ở chính sách. Một số nội dung liên quan đến ưu đãi chủ đầu tư NƠXH, đối tượng ưu tiên mua, thuê mua, hình thức phát triển NƠXH và cơ chế đặt hàng cũng được rà soát, bổ sung. Đối với nhà ở công vụ, dự thảo đề xuất miễn tiền thuê nhà cho cán bộ, công chức, viên chức và người lao động được điều động, luân chuyển, biệt phái đến công tác tại xã có điều kiện kinh tế - xã hội đặc biệt khó khăn, khu vực biên giới, hải đảo.

Các quy định về quản lý, sử dụng nhà chung cư cũng được điều chỉnh theo hướng làm rõ phần sở hữu riêng, sở hữu chung; bổ sung quy định về khu vực để xe điện, sạc điện, đổi pin theo quy chuẩn xây dựng và hình thức tổ chức hội nghị nhà chung cư trực tuyến. Dự thảo đồng thời bổ sung mô hình thuê đơn vị chuyên nghiệp thực hiện một số nhiệm vụ của Ban quản trị, nhằm nâng cao chất lượng quản lý, vận hành nhà chung cư.

Với cải tạo, xây dựng lại nhà chung cư, dự thảo làm rõ quyền và trách nhiệm của chủ sở hữu khi nhà chung cư hết thời hạn sử dụng, thuộc diện phải phá dỡ; bổ sung hình thức hợp đồng xây dựng - chuyển giao (BT) trong thực hiện dự án, góp phần đa dạng hóa nguồn vốn. Thủ tục lựa chọn chủ đầu tư cũng được đề xuất đơn giản hóa, tạo thuận lợi hơn cho doanh nghiệp tham gia.

Bên cạnh các chính sách mới, dự thảo rà soát quy định về tài chính phát triển nhà ở, huy động và sử dụng vốn, quản lý nhà ở thuộc tài sản công, giao dịch và thế chấp nhà ở, dự án nhà ở. Một số nội dung trùng lặp với Bộ luật Dân sự và pháp luật liên quan được lược bỏ. Thẩm quyền quản lý, sử dụng nhà ở thuộc tài sản công và một số nhiệm vụ quản lý nhà chung cư được phân cấp phù hợp với mô hình chính quyền địa phương hai cấp.

CẢI CÁCH THỦ TỤC, MINH BẠCH HÓA THỊ TRƯỜNG BĐS

Cùng với chính sách phát triển nhà ở, dự thảo Luật Kinh doanh BĐS (sửa đổi) tập trung tháo gỡ vướng mắc trong hoạt động đầu tư, kinh doanh và nâng cao hiệu quả quản lý thị trường. Dự thảo gồm 10 chương, 61 điều, giảm 22 điều, tương đương khoảng 30% so với Luật Kinh doanh BĐS năm 2023. Trên 50% số điều được nghiên cứu sửa đổi, bổ sung, do đó dự án luật được xây dựng theo hướng thay thế luật hiện hành.

Một số nội dung mới được đưa vào dự thảo nhằm tạo cơ sở pháp lý rõ ràng hơn cho hoạt động giao dịch. Trong đó có quy định về nguyên tắc và khung quy trình giao dịch BĐS; mã định danh điện tử đối với tổ chức, cá

nhân, BĐS hoặc đối tượng khác thuộc phạm vi điều chỉnh của Luật Kinh doanh BĐS và Luật Nhà ở. Dự thảo cũng bổ sung cơ chế bảo đảm đối với 5% giá trị còn lại của hợp đồng kinh doanh BĐS, thông qua việc chuyển vào tài khoản phong tỏa hoặc theo thỏa thuận của các bên; đồng thời mở rộng các loại hợp đồng chuyển nhượng trong kinh doanh BĐS.

Đối với hợp đồng mua bán căn hộ chung cư, dự thảo quy định hợp đồng phải được công khai trên Hệ thống thông tin về nhà ở và thị trường BĐS trước khi áp dụng, không phải thực hiện thủ tục đăng ký, công khai hợp đồng theo quy định của pháp luật khác. Quy định này nhằm xử lý tình trạng chồng lấn giữa pháp luật về kinh doanh BĐS và pháp luật bảo vệ quyền lợi người tiêu dùng, đồng thời giảm bớt thủ tục cho doanh nghiệp trong quá trình thực hiện giao dịch.

Một nội dung quan trọng khác là phân quyền, phân cấp trong quản lý hoạt động kinh doanh BĐS. Theo dự thảo, UBND cấp tỉnh được quyết định cho phép chuyển nhượng toàn bộ hoặc một phần dự án BĐS đối với những dự án thuộc thẩm quyền chấp thuận chủ trương đầu tư của Thủ tướng Chính phủ. Cùng với việc phân quyền, dự thảo làm rõ trách nhiệm của Chủ tịch UBND cấp tỉnh trong xem xét, quyết định và kiểm tra điều kiện chuyển nhượng; trách nhiệm của chủ đầu tư đối với các cam kết, nghĩa vụ liên quan sau khi dự án được chấp thuận chuyển nhượng.

Dự thảo cũng điều chỉnh trách nhiệm quản lý nhà nước để phù hợp với mô hình chính quyền địa phương hai cấp. Theo đó, một số nhiệm vụ, quyền hạn trước đây thuộc chính quyền cấp huyện được chuyển cho UBND cấp xã thực hiện, bảo đảm hoạt động quản lý không bị gián đoạn. Quy định về nhiệm vụ thanh tra của Bộ Xây dựng trong lĩnh vực kinh doanh BĐS được bãi bỏ để thống nhất với Luật Thanh tra năm 2025, tránh chồng chéo về thẩm quyền.

Cải cách điều kiện kinh doanh và thủ tục hành chính là một trong những nội dung đáng chú ý của dự thảo. Theo Bộ Xây dựng, dự thảo dự kiến cắt giảm 7 điều kiện đầu tư kinh doanh đối với tổ chức, cá nhân hoạt động trong lĩnh vực BĐS. Các điều kiện được đề xuất bãi bỏ liên quan đến hoạt động của sàn giao dịch BĐS, dịch vụ môi giới, tư vấn và quản lý BĐS. Một số điều kiện đối với BĐS đưa vào kinh doanh, chuyển nhượng dự án cũng được rà soát, lược bỏ hoặc đơn giản hóa.

Về thủ tục hành chính, dự thảo dự kiến cắt giảm 4 trong tổng số 12 thủ tục, đồng thời đơn giản hóa 7 thủ tục khác. Các nội dung tập trung vào thủ tục cấp mới, cấp lại giấy phép hoạt động của sàn giao dịch BĐS; cấp chứng chỉ hành nghề môi giới; chuyển nhượng dự án; thông báo nhà ở hình thành trong tương lai đủ điều kiện bán, cho thuê mua và một số thủ tục liên quan đến quyền sử dụng đất đã có hạ tầng kỹ thuật trong dự án. Việc điều chỉnh hướng tới giảm thành phần hồ sơ, rút ngắn quy trình và thống nhất thẩm quyền giải quyết.

Cùng với cải cách thủ tục, dự thảo chú trọng hoàn thiện hệ thống thông tin, cơ sở dữ liệu về nhà ở và thị trường BĐS theo hướng kết nối, chia sẻ, cập nhật dữ liệu "đúng, đủ, sạch, sống". Việc bổ sung mã định danh điện tử và quy định công khai thông tin dự án, hợp đồng giao dịch được kỳ vọng giúp người dân, doanh nghiệp thuận lợi hơn khi tìm kiếm, tiếp cận thông tin, đồng thời hỗ trợ cơ quan quản lý theo dõi, giám sát thị trường.

Các quy định về công khai thông tin, quy trình giao dịch và quản lý hoạt động môi giới cũng hướng tới hạn chế tình trạng lợi dụng hoạt động môi giới để lừa đảo, chiếm đoạt tài sản, thao túng và "thổi giá" BĐS. Qua đó, góp phần bảo vệ quyền, lợi ích hợp pháp của người dân, doanh nghiệp và nâng cao tính minh bạch trong các giao dịch.

Về điều kiện thực thi, hai dự thảo được xây dựng trên cơ sở sử dụng bộ máy quản lý hiện có, không làm phát sinh cơ quan mới hoặc tăng biên chế. Hạ tầng công nghệ thông tin và hệ thống dữ liệu đang được triển khai sẽ được kế thừa, hoàn thiện, nâng cấp để đáp ứng yêu cầu quản lý và khai thác thông tin...

Việc sửa đổi đồng thời Luật Nhà ở và Luật Kinh doanh BĐS có ý nghĩa quan trọng trong việc xử lý những quy định còn chồng chéo, tạo sự thống nhất giữa chính sách phát triển nhà ở với hoạt động đầu tư, kinh doanh BĐS.

Khi được Quốc hội thông qua và triển khai, các quy định mới sẽ góp phần tháo gỡ vướng mắc về thủ tục, thẩm quyền, mở rộng cơ hội phát triển nhà ở cho thuê, đồng thời tăng cường công khai, minh bạch trong giao dịch. Đây là cơ sở để nâng cao hiệu quả quản lý nhà nước và thúc đẩy thị trường BĐS phát triển ổn định, lành mạnh hơn.

Việc sửa đổi đồng thời Luật Nhà ở và Luật Kinh doanh BĐS có ý nghĩa quan trọng trong việc xử lý những quy định còn chồng chéo, tạo sự thống nhất giữa chính sách phát triển nhà ở với hoạt động đầu tư, kinh doanh BĐS.

Khi được Quốc hội thông qua và triển khai, các quy định mới sẽ góp phần tháo gỡ vướng mắc về thủ tục, thẩm quyền, mở rộng cơ hội phát triển nhà ở cho thuê, đồng thời tăng cường công khai, minh bạch trong giao dịch. Đây là cơ sở để nâng cao hiệu quả quản lý nhà nước và thúc đẩy thị trường BĐS phát triển ổn định, lành mạnh hơn.

Quản lý rủi ro bảo đảm cấp nước an toàn **theo hướng tiếp cận hệ thống**



PGS.TS NGUYỄN HỒNG TIẾN*

Bảo đảm cấp nước an toàn là yêu cầu thiết yếu nhằm bảo vệ sức khỏe cộng đồng, duy trì hoạt động kinh tế - xã hội và nâng cao chất lượng cuộc sống. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, đô thị hóa nhanh, gia tăng nhu cầu sử dụng nước, suy giảm và ô nhiễm nguồn nước, các rủi ro đối với hệ thống cấp nước ngày càng đa dạng và phức tạp. Phương thức quản lý truyền thống chủ yếu tập trung vào kiểm soát các yếu tố kỹ thuật và xử lý sự cố sau khi xảy ra, do đó chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu quản lý rủi ro trong điều kiện mới.

Bài viết đề xuất quản lý rủi ro bảo đảm cấp nước an toàn theo hướng tiếp cận hệ thống, trong đó xem xét đồng thời các rủi ro từ nguồn nước, công trình, nhà máy, mạng lưới đến người sử dụng và các rủi ro về thể chế, chính sách, quy hoạch, đầu tư, tài chính, tổ chức, nguồn nhân lực và chuyển đổi số. Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất một số giải pháp tổ chức triển khai nhằm chuyển từ tư duy ứng phó sự cố sang chủ động phòng ngừa, tăng cường khả năng chống chịu và bảo đảm cấp nước an toàn, ổn định và bền vững.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Nước là một trong những nhu cầu thiết yếu của đời sống con người. Nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt phải đáp ứng các yêu cầu về chất lượng theo quy định hiện hành và được cung cấp thông qua hệ thống có khả năng bảo đảm an toàn trong quá trình khai thác, xử lý, truyền dẫn, phân phối và sử dụng. Việc cung cấp đủ nước sạch, ổn định và an toàn có ý nghĩa đặc biệt quan trọng đối với bảo vệ sức khỏe cộng đồng, duy trì các hoạt động kinh tế - xã hội và nâng cao chất lượng cuộc sống của người dân. Bảo đảm cấp nước an toàn không chỉ dừng lại ở việc kiểm soát chất lượng nước tại nhà máy mà phải được xem xét trên toàn bộ chuỗi cung cấp nước, từ nguồn nước, công trình thu, hệ thống truyền tải nước thô, nhà máy xử lý, mạng lưới phân phối đến điểm sử dụng. Bên cạnh yêu cầu về chất lượng, một hệ thống cấp nước an toàn còn phải bảo đảm tính liên tục, ổn định, đủ lưu lượng và áp lực, đồng thời có khả năng ứng phó với các sự cố và những biến động bất thường.

Tại Việt Nam, yêu cầu kiểm soát chất lượng nước sạch đã được cụ thể hóa trong hệ thống pháp luật và quy chuẩn kỹ thuật. Đáng chú ý, Thông tư số 52/2024/TT-BYT ngày 31/12/2024 của Bộ Y tế ban hành QCVN 01-1:2024/BYT về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, đồng thời quy định về nội kiểm, ngoại kiểm, kiểm tra và giám sát chất lượng nước sạch; văn bản này có hiệu lực từ ngày 01/7/2025.

Tuy nhiên, bảo đảm cấp nước an toàn trong thực tế không chỉ phụ thuộc vào việc đáp ứng các thông số chất lượng nước. Hệ thống cấp nước hiện nay chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố như biến đổi khí hậu, hạn hán, xâm nhập mặn, lũ lụt, ô nhiễm nguồn nước, suy giảm nguồn nước, đô thị hóa nhanh, gia tăng nhu cầu sử dụng nước, sự phát triển của các khu đô thị và công trình cao tầng, yêu cầu đầu tư lớn, biến động chi phí, thay đổi quy hoạch, năng lực quản trị, chất lượng nguồn nhân lực và các nguy cơ từ chuyển đổi số, an ninh mạng. Do đó, nếu chỉ quản lý rủi ro theo từng công đoạn kỹ thuật hoặc chỉ tập trung vào kiểm soát chất lượng nước tại nhà máy thì chưa đủ để bảo đảm an toàn cho toàn bộ hệ thống. Cần chuyển sang một phương thức quản lý có tính tổng thể, trong đó các rủi ro được nhận diện, đánh giá, phân loại và kiểm soát theo mối quan hệ giữa các bộ phận của toàn hệ thống.

QUẢN LÝ RỦI RO BẢO ĐẢM CẤP NƯỚC AN TOÀN THEO PHƯƠNG THỨC TRUYỀN THỐNG

Tiếp cận truyền thống trong quản lý rủi ro cấp nước chủ

(*) *Nguyên Cục trưởng Cục Hạ tầng kỹ thuật, Bộ Xây dựng*



Bên cạnh yêu cầu về chất lượng, một hệ thống cấp nước an toàn còn phải bảo đảm tính liên tục, ổn định, đủ lưu lượng và áp lực, đồng thời có khả năng ứng phó với các sự cố và những biến động bất thường.

yếu dựa trên việc kiểm tra, đánh giá và kiểm soát các yếu tố kỹ thuật theo các tiêu chuẩn, quy chuẩn hiện hành. Công tác quản lý thường được tổ chức theo từng công đoạn của hệ thống như khai thác nguồn nước, xử lý nước, truyền dẫn và phân phối. Khi xảy ra sự cố, đơn vị cấp nước tập trung xác định nguyên nhân, khắc phục và đưa hệ thống trở lại trạng thái vận hành bình thường.

Phương thức này có vai trò quan trọng trong quá trình phát triển của ngành cấp nước bởi tính tương đối đơn giản, dễ tổ chức thực hiện và phù hợp với yêu cầu kiểm soát chất lượng nước. Tuy nhiên, hạn chế cơ bản của cách tiếp cận này là thường thiên về kiểm tra sự tuân thủ và xử lý hậu quả hơn là chủ động nhận diện và phòng ngừa rủi ro.

Trong điều kiện hiện nay, một sự cố tại một bộ phận của hệ thống có thể tạo ra tác động dây chuyền đến nhiều bộ phận khác. Chẳng hạn, sự suy giảm chất lượng nguồn nước có thể làm thay đổi công nghệ xử lý, làm tăng chi phí hóa chất và năng lượng, ảnh hưởng đến chất lượng nước sau xử lý và cuối cùng tác động đến khả năng cung cấp nước cho người sử dụng. Tương tự, một quyết định quy hoạch giao thông thay đổi có thể dẫn đến việc di dời đường ống, làm phát sinh chi phí lớn và ảnh hưởng đến tính liên tục của dịch vụ cấp nước.

Biến đổi khí hậu, suy giảm nguồn nước, gia tăng ô nhiễm, đô thị hóa nhanh, nhu cầu sử dụng nước ngày càng lớn cùng với những thay đổi về thể chế, chính sách, quy hoạch, đầu tư và tài chính đang làm cho hệ thống cấp nước trở thành một hệ thống phức tạp với nhiều mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau.

Trong bối cảnh đó, quản lý rủi ro cần chuyển từ tư duy "xử lý sự cố" sang "quản lý rủi ro chủ động", từ quản lý từng công đoạn sang quản lý toàn hệ thống và từ phạm vi kỹ thuật đơn thuần sang kết hợp giữa kỹ thuật, quản trị, thể chế, kinh tế, xã hội và công nghệ.

QUẢN LÝ RỦI RO BẢO ĐẢM AN TOÀN CẤP NƯỚC THEO HƯỚNG TIẾP CẬN HỆ THỐNG

Quan điểm tiếp cận

Quản lý rủi ro cấp nước theo hướng tiếp cận hệ thống là phương thức quản lý trong đó toàn bộ hệ thống cấp nước được xem xét như một chỉnh thể thống nhất, có mối liên hệ và phụ thuộc lẫn nhau giữa các thành phần. Theo cách tiếp cận này, rủi ro không chỉ được xem xét từ tài nguyên nước, khai thác, xử lý, truyền tải, phân phối đến người sử dụng mà còn bao gồm các rủi ro phát sinh từ tổ chức quản lý, cơ chế chính sách, quy hoạch, đầu tư xây dựng, tài chính, giá nước, nguồn nhân lực, chuyển đổi số, an ninh mạng và các yếu tố xã hội. Cách tiếp cận này tương đồng với nguyên tắc của Water Safety Plan (WSP) được Tổ chức Y tế thế giới (WHO) khuyến nghị, trong đó đánh giá rủi ro được thực hiện trên toàn bộ chuỗi cung cấp nước từ nguồn nước đến người sử dụng, xác định các mối nguy, đánh giá mức độ rủi ro, thiết lập biện pháp kiểm soát, giám sát và cải tiến liên tục. WHO hiện coi WSP là một trong những phương thức hiệu quả để quản lý an toàn nước uống một cách chủ động và có hệ thống. Điểm khác biệt quan trọng của cách tiếp cận hệ thống là không chỉ đặt câu hỏi "sự cố xảy ra ở đâu?" mà phải đặt ra các câu hỏi rộng hơn: "rủi ro có thể xuất hiện ở đâu?", "nguyên nhân từ đâu?", "các bộ phận nào có thể bị ảnh hưởng?", "tác động dây chuyền như thế nào?", "ai chịu trách nhiệm kiểm soát?" và "cần chuẩn bị như thế nào để hệ thống vẫn hoạt động khi điều kiện bất lợi xảy ra?".

Nhận diện các nhóm rủi ro trong quản lý cấp nước

a) Nhóm rủi ro về nguồn nước và kết cấu hạ tầng cấp nước

- Rủi ro nguồn nước: Đây là nhóm rủi ro đầu tiên và có tính quyết định đối với an toàn cấp nước. Công tác quản lý cần điều tra, đánh giá đầy đủ nguồn nước mặt và nước dưới

đất; xác định các nguồn gây ô nhiễm; theo dõi diễn biến chất lượng và trữ lượng; đồng thời đánh giá tác động của hạn hán, xâm nhập mặn, lũ lụt, biến đổi khí hậu, khai thác quá mức và các sự cố môi trường. Trên cơ sở đó cần xác định vùng bảo hộ vệ sinh nguồn nước, thiết lập cơ chế giám sát và xây dựng các phương án nguồn nước dự phòng.

- Rủi ro tại công trình thu và hệ thống truyền tải nước thô: Công trình thu là cửa ngõ của hệ thống cấp nước, do đó cần kiểm soát an toàn đối với hồ chứa, đập, trạm bơm, công trình thu và tuyến ống nước thô. Các kịch bản như vỡ đường ống, mất điện, bồi lắng, sạt lở, lũ lụt, xâm nhập trái phép hoặc phá hoại công trình cần được nhận diện và xây dựng phương án ứng phó phù hợp.

- Rủi ro tại nhà máy xử lý nước: Nhà máy xử lý nước là khâu trung tâm trong việc tạo ra nước sạch. Rủi ro có thể xuất hiện do công nghệ không phù hợp với sự biến động của nguồn nước, chất lượng hóa chất, sự cố thiết bị, mất điện, sai sót trong vận hành, giảm hiệu quả khử trùng hoặc hạn chế về năng lực kiểm nghiệm. Vì vậy, cần định kỳ đánh giá công nghệ, kiểm soát hóa chất, bảo trì thiết bị, kiểm soát quá trình xử lý và tăng cường năng lực phòng thí nghiệm.

- Rủi ro mạng lưới cấp nước: Mạng lưới phân phối có phạm vi rộng và nhiều điểm tiếp xúc với môi trường bên ngoài nên tiềm ẩn nhiều rủi ro như rò rỉ, thất thoát nước, vỡ ống, áp lực thấp, nước chảy ngược, đấu nối không phù hợp và sự xuống cấp của đường ống. Việc quản lý cần dựa trên dữ liệu về tuổi thọ tài sản, tình trạng đường ống, áp lực, lưu lượng và mức độ dự phòng. Phân vùng mạng lưới (DMA), quản lý áp lực và giám sát lưu lượng có thể hỗ trợ phát hiện sớm bất thường và kiểm soát thất thoát.

b) Nhóm rủi ro về quản trị và vận hành

- Rủi ro vận hành: An toàn cấp nước phụ thuộc lớn vào chất lượng vận hành hằng ngày. Do đó cần chuẩn hóa quy trình vận hành, bảo trì và xử lý sự cố; xây dựng các quy trình thao tác chuẩn (SOP); thực hiện bảo dưỡng định kỳ đối với hệ thống cơ điện; đồng thời tổ chức đào tạo và diễn tập ứng phó sự cố cho lực lượng vận hành.

- Rủi ro từ nhu cầu sử dụng nước: Tốc độ đô thị hóa nhanh, sự phát triển của các khu đô thị tập trung, công trình cao tầng, khu công nghiệp, cơ sở dịch vụ và du lịch có thể làm nhu cầu sử dụng nước tăng nhanh hoặc biến động theo thời gian. Vì vậy, quy hoạch và đầu tư cấp nước phải gắn với dự báo nhu cầu sử dụng nước theo không gian và thời gian.

- Rủi ro tài chính: Hệ thống cấp nước đòi hỏi nguồn vốn lớn cho đầu tư, cải tạo và duy trì tài sản. Các rủi ro liên quan đến chi phí vận hành, chi phí năng lượng, hóa chất, vật tư, khấu hao, doanh thu nước thương phẩm, thất thoát nước, nợ khách hàng và khả năng huy động vốn đều có thể ảnh hưởng đến tính bền vững của hệ thống. Cơ chế giá nước cần có khả năng phản ánh hợp lý chi phí cung cấp dịch vụ, đồng thời bảo đảm khả năng tiếp cận nước sạch của người dân.

- Rủi ro pháp lý, thể chế và quy hoạch: Sự thay đổi hoặc thiếu đồng bộ giữa các quy hoạch có thể tạo ra những rủi ro đáng kể đối với hệ thống cấp nước. Ví dụ, thay đổi hướng tuyến giao thông có thể buộc di dời đường ống; phát triển đô thị ngoài dự báo có thể làm thay đổi vùng phục vụ; hoặc sự chồng lấn giữa các đơn vị cấp nước có thể gây khó khăn trong phân định trách nhiệm. Vì vậy, quản lý rủi ro cấp nước cần được tích hợp với quy hoạch đô thị, quy hoạch hạ tầng kỹ thuật và quản lý tài nguyên nước.

c) Nhóm rủi ro từ chuyển đổi số, dữ liệu và an ninh mạng

Chuyển đổi số đang tạo ra cơ hội nâng cao hiệu quả quản lý hệ thống cấp nước nhưng đồng thời cũng hình thành những rủi ro mới. Một trong những vấn đề phổ biến là dữ liệu bị phân tán giữa các hệ thống quản lý khách hàng, GIS, SCADA, quản lý tài sản và các hệ thống vận hành khác. Khi dữ liệu không được chuẩn hóa và liên thông, đơn vị cấp nước khó có thể hình thành một bức tranh đầy đủ về trạng thái của toàn hệ thống. Độ chính xác của dữ liệu mạng lưới cũng là vấn đề cần quan tâm. Đối với hệ thống đường ống ngầm, sai lệch về vị trí, cao độ hoặc thông tin vật liệu có thể gây khó khăn cho công tác sửa chữa, bảo trì và quản lý tài sản. Bên cạnh đó, khi các nhà máy và mạng lưới ngày càng được điều khiển bằng hệ thống số, nguy cơ mất an toàn thông tin và an ninh mạng trở nên đáng kể. Do đó, quản lý rủi ro phải bao gồm phân quyền truy cập, sao lưu dữ liệu, bảo vệ hệ thống điều khiển, giám sát an ninh mạng, phương án phục hồi sau sự cố và bảo đảm khả năng vận hành trong trường hợp hệ thống số bị gián đoạn.

d) Nhóm rủi ro về tổ chức bộ máy và nguồn nhân lực

- Rủi ro từ tổ chức bộ máy: Sự phân tán trách nhiệm hoặc chồng chéo giữa các phòng ban có thể làm chậm quá trình ra quyết định, đặc biệt trong tình huống khẩn cấp. Một hệ thống quản lý rủi ro hiệu quả cần xác định rõ trách nhiệm, quyền hạn và đầu mối điều phối; đồng thời xây dựng cơ chế chia sẻ thông tin nhanh giữa các bộ phận.

- Rủi ro từ nguồn nhân lực: Con người là yếu tố quyết định trong vận hành hệ thống cấp nước. Việc thiếu nhân lực có chuyên môn, đội ngũ chuyên gia có kinh nghiệm, đào tạo chưa đáp ứng yêu cầu công nghệ mới hoặc già hóa lực lượng lao động có thể làm suy giảm năng lực vận hành. Vì vậy cần có chiến lược phát triển nguồn nhân lực, đào tạo liên tục, chuyển giao tri thức giữa các thế hệ và xây dựng đội ngũ chuyên gia về nguồn nước, công nghệ xử lý, thủy lực mạng lưới, tự động hóa, dữ liệu và an ninh mạng.

ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP TỔ CHỨC TRIỂN KHAI QUẢN LÝ RỦI RO BẢO ĐẢM CẤP NƯỚC AN TOÀN THEO HƯỚNG TIẾP CẬN HỆ THỐNG

Xây dựng khung quản lý rủi ro cấp nước thống nhất

Trước hết, cần xây dựng một khung quản lý rủi ro cấp nước thống nhất ở cấp quốc gia và địa phương, trong đó xác định rõ mục tiêu, nguyên tắc, phạm vi, trách nhiệm và cơ chế phối hợp giữa các cơ quan quản lý nhà nước, đơn vị cấp nước và các bên liên quan. Khung quản lý cần chuyển trọng tâm từ kiểm tra riêng lẻ từng công đoạn sang đánh giá toàn bộ chuỗi cung cấp nước. Việc đánh giá phải bao gồm cả rủi ro kỹ

thuật và rủi ro quản trị, tài chính, quy hoạch, nguồn nhân lực, công nghệ và xã hội.

Xây dựng bản đồ rủi ro và cơ sở dữ liệu rủi ro cấp nước

Mỗi hệ thống cấp nước cần xây dựng một "hồ sơ rủi ro" bao gồm các nguồn nước, công trình, thiết bị, tuyến ống, khu vực có nguy cơ cao, các sự cố trong quá khứ và các yếu tố có thể ảnh hưởng đến an toàn cấp nước.

Các dữ liệu này cần được tích hợp trên nền tảng GIS và kết nối với dữ liệu SCADA, quản lý tài sản, khách hàng và các cơ sở dữ liệu liên quan. Khi đó, cơ quan quản lý và đơn vị vận hành có thể hình thành hệ thống giám sát rủi ro theo không gian và thời gian, hỗ trợ ra quyết định nhanh hơn.

Xây dựng cơ chế đánh giá rủi ro định kỳ và cải tiến liên tục

Quản lý rủi ro không phải là một nhiệm vụ thực hiện một lần. Hệ thống cấp nước luôn thay đổi do nguồn nước, phát triển đô thị, đổi mới công nghệ, nhu cầu sử dụng nước và điều kiện khí hậu… Do đó, cần tổ chức đánh giá rủi ro định kỳ, đồng thời cập nhật ngay sau các sự cố lớn, thay đổi công nghệ, mở rộng mạng lưới hoặc thay đổi điều kiện nguồn nước. Có thể áp dụng chu trình: Nhận diện rủi ro → đánh giá → phân loại ưu tiên → lựa chọn biện pháp kiểm soát → giám sát → đánh giá hiệu quả → cập nhật và cải tiến.

Gắn quản lý rủi ro với quá trình ra quyết định đầu tư

Một trong những yêu cầu quan trọng của tiếp cận hệ thống là đưa kết quả đánh giá rủi ro vào quá trình ra quyết định đầu tư. Các dự án cấp nước không chỉ cần được đánh giá về quy mô và hiệu quả kinh tế mà cần xem xét mức độ giảm rủi ro mà dự án mang lại. Ví dụ, đầu tư tuyến truyền tải thứ hai có thể làm tăng khả năng dự phòng; liên kết mạng lưới giữa các vùng có thể tăng khả năng cấp nước khi xảy ra sự cố; thay thế đường ống cũ có thể giảm thất thoát và nguy cơ mất an toàn. Theo cách này, đầu tư cấp nước được chuyển từ tư duy "đầu tư theo nhu cầu hiện tại" sang "đầu tư theo nhu cầu và mức độ rủi ro trong tương lai".

Xây dựng hệ thống cảnh báo sớm và phương án ứng phó sự cố

Cần xây dựng các kịch bản ứng phó đối với những rủi ro có khả năng gây tác động lớn như ô nhiễm nguồn nước, hạn hán, xâm nhập mặn, mất điện diện rộng, vỡ tuyến ống truyền tải chính, sự cố nhà máy, ngập lụt, cháy nổ, tấn công mạng và gián đoạn hệ thống điều khiển. Mỗi kịch bản phải xác định rõ dấu hiệu cảnh báo, ngưỡng kích hoạt, người có thẩm quyền quyết định, lực lượng thực hiện, nguồn lực dự phòng, phương án thông tin và phương án khôi phục dịch vụ.

Tăng cường quản lý tài sản

Quản lý tài sản cần được coi là một bộ phận của quản lý rủi ro. Thay vì chỉ sửa chữa khi thiết bị hoặc đường ống hư hỏng, cần đánh giá xác suất hư hỏng và hậu quả của sự cố để xác định thứ tự ưu tiên thay thế. Đối với những tài sản có mức độ rủi ro cao, cần có phương án dự phòng, thiết bị thay thế và kế hoạch bảo trì phù hợp. Đây là cơ sở để tối ưu hóa nguồn vốn đầu tư và giảm nguy cơ gián đoạn cấp nước.

Phát triển nguồn nhân lực và văn hóa quản lý rủi ro

Tiếp cận hệ thống chỉ có thể thành công khi được chuyển hóa thành văn hóa quản lý trong toàn bộ tổ chức. Mỗi cán bộ, kỹ sư và người vận hành cần nhận thức rằng quản lý rủi ro không phải nhiệm vụ riêng của một phòng ban mà là trách nhiệm chung. Cần tổ chức các chương trình đào tạo về đánh giá rủi ro, quản lý tài sản, vận hành an toàn, ứng phó sự cố, chuyển đổi số và an ninh mạng.

Tăng cường công khai, minh bạch và truyền thông rủi ro

Bảo đảm cấp nước an toàn liên quan trực tiếp đến sức khỏe cộng đồng nên thông tin về chất lượng nước, các sự cố và biện pháp ứng phó cần được truyền đạt minh bạch, chính xác và kịp thời. Truyền thông rủi ro cần được xem là một bộ phận của hệ thống quản lý chứ không chỉ là hoạt động truyền thông sau sự cố. Việc cung cấp thông tin phù hợp sẽ góp phần tăng niềm tin của người dân đối với dịch vụ cấp nước và hỗ trợ xử lý các tình huống khẩn cấp.

KẾT LUẬN

Bảo đảm cấp nước an toàn là một nhiệm vụ có tính chiến lược, liên quan trực tiếp đến sức khỏe cộng đồng, phát triển kinh tế - xã hội và khả năng chống chịu của đô thị. Quản lý rủi ro bảo đảm cấp nước an toàn theo hướng tiếp cận hệ thống cần được coi là một bước chuyển quan trọng trong đổi mới quản lý cấp nước. Từng bước xây dựng và áp dụng một khung quản lý rủi ro cấp nước thống nhất, kết hợp các nguyên tắc của kế hoạch bảo đảm an toàn nước với yêu cầu quản lý nhà nước và điều kiện thực tế của từng địa phương. Cùng với đó là xây dựng cơ sở dữ liệu thống nhất, tăng cường chuyển đổi số, phát triển hệ thống cảnh báo sớm, nâng cao năng lực nguồn nhân lực và hoàn thiện cơ chế phối hợp giữa các ngành, các cấp và các đơn vị cấp nước.

Quản lý rủi ro bảo đảm cấp nước an toàn theo hướng tiếp cận hệ thống không chỉ là yêu cầu đối với các đơn vị cấp nước mà cần trở thành một định hướng quan trọng trong đổi mới quản lý nhà nước về cấp nước ở Việt Nam, hướng tới mục tiêu cung cấp nước an toàn, liên tục, ổn định, hiệu quả và bền vững cho người dân và các hoạt động phát triển kinh tế - xã hội.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Quốc hội (2023). Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15, ngày 27/11/2023, có hiệu lực từ ngày 01/7/2024.

2. Chính phủ (2024). Nghị định số 53/2024/NĐ-CP ngày 16/5/2024 quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Tài nguyên nước.

3. Bộ Y tế (2024). Thông tư số 52/2024/TT-BYT ngày 31/12/2024 ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia và quy định kiểm tra, giám sát chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt; QCVN 01-1:2024/BYT.

4. World Health Organization (WHO) & International Water Association (IWA) (2023). Water Safety Plan Manual: Step-by-step Risk Management for Drinking-water Suppliers, 2nd edition. Geneva: World Health Organization. ISBN 978-92-4-006769-1.

5. World Health Organization (WHO) (2026). Water Safety Plan: Step-by-step Risk Management for Drinking-water Suppliers - Training Package. Geneva: World Health Organization.

6. International Water Association (IWA). Water Safety Planning. Tài liệu hướng dẫn về tiếp cận quản lý an toàn nước từ nguồn nước đến người sử dụng.

QUYẾT ĐỊNH 1040/QĐ-BXD:

Bước tiến mới trong chuẩn hóa hợp đồng xây dựng



LS VŨ LÊ BẰNG*



LS TRẦN ANH MINH**

Ngày 26/6/2026, Bộ Xây dựng ban hành Quyết định 1040/QĐ-BXD công bố mẫu hợp đồng xây dựng. Quyết định 1040/QĐ-BXD cung cấp bộ hợp đồng xây dựng mẫu mới được chuẩn hóa theo pháp luật Việt Nam với một số thay đổi pháp lý quan trọng để chủ đầu tư và nhà thầu xem xét lựa chọn, nhưng đồng thời Quyết định vẫn để ngỏ cho phép lựa chọn hợp đồng xây dựng mẫu quốc tế thông dụng như FIDIC.

1. SƠ LƯỢC QUÁ TRÌNH CHUẨN HÓA HỢP ĐỒNG MẪU XÂY DỰNG TRƯỚC QUYẾT ĐỊNH 1040/QĐ-BXD

Hợp đồng xây dựng luôn gắn liền với các dự án có mức độ phức tạp cao, thể hiện ở quy mô lớn, thời gian thực hiện kéo dài, giá trị đầu tư đáng kể và sự tham gia của nhiều bên. Trong bối cảnh đó, chuẩn hóa hợp đồng xây dựng mẫu là một yêu cầu quan trọng nhằm thiết lập khuôn khổ pháp lý rõ ràng và nhất quán cho quá trình triển khai dự án.

Việc chuẩn hóa không chỉ giúp các bên tiết kiệm thời gian và chi phí đàm phán, mà còn góp phần xác định rõ trách nhiệm, phân bổ hợp lý rủi ro, thiết lập cơ chế quản lý và phối hợp công việc, đồng thời bảo đảm các điều khoản hợp đồng được xây dựng trên một nền tảng pháp lý thống nhất. Qua đó, các bên có thể chủ động kiểm soát rủi ro, hạn chế những bất đồng trong quá trình thực hiện và, quan trọng hơn, giảm thiểu nguy cơ phát sinh tranh chấp cũng như chi phí giải quyết tranh chấp.

Trong quá trình xây dựng và hoàn thiện pháp luật về xây dựng tại Việt Nam, Bộ Xây dựng đã nhiều lần ban hành và cập nhật các mẫu hợp đồng xây dựng nhằm đáp ứng yêu cầu thực tiễn và những thay đổi của khung pháp lý qua từng thời kỳ. Có thể kể đến:

(i) Thông tư 02/2005/TT-BXD ban hành mẫu Hợp đồng xây dựng cho việc tư vấn lập quy hoạch xây dựng, Hợp đồng xây dựng cho việc thi công xây dựng công trình và Hợp đồng xây dựng chìa khóa trao tay EPC.

(ii) Thông tư 08/2011/TT-BXD ban hành mẫu Hợp đồng tư vấn xây dựng.

(iii) Thông tư 09/2011/TT-BXD ban hành mẫu Hợp đồng thi công xây dựng công trình.

(iv) Thông tư 08/2016/TT-BXD ban hành mẫu Hợp đồng tư vấn xây dựng.

(v) Thông tư 09/2016/TT-BXD ban hành mẫu Hợp đồng thi công xây dựng công trình.

Việc ban hành và cập nhật các mẫu hợp đồng này gắn liền với những dấu mốc quan trọng trong quá trình phát triển của pháp luật xây dựng Việt Nam, từ Luật Xây dựng 2003, Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của các luật liên quan đến đầu tư xây dựng cơ bản năm 2009 đến Luật Xây dựng 2014.

Qua từng thời kỳ, các mẫu hợp đồng cho thấy nỗ lực của Bộ Xây dựng trong việc xây dựng một khuôn khổ hợp đồng phù hợp với quy định pháp luật hiện hành, đồng thời tạo thuận lợi cho các chủ thể tham gia dự án trong quá trình soạn thảo, đàm phán và thực hiện hợp đồng. Việc từng bước chuẩn hóa hợp đồng qua đó góp phần nâng cao tính minh bạch, khả năng dự liệu và hiệu quả trong việc triển khai các dự án xây dựng tại Việt Nam.

Tuy nhiên, thực tiễn áp dụng các mẫu hợp đồng được ban hành theo các thông tư nêu trên cũng bộc lộ một số hạn chế. Đáng chú ý, mức độ chi tiết của các mẫu hợp đồng chưa thực

(*) (**) *Công ty Luật TNHH Nishimura & Asahi Việt Nam*

NISHIMURA & ASAHI

Chuyên mục do Tạp chí Xây dựng phối hợp cùng Hội Pháp luật Xây dựng Việt Nam thực hiện.
HÂN HẠNH TÀI TRỢ CHUYÊN MỤC



7 mẫu hợp đồng xây dựng được công bố tại Quyết định 1040/QĐ-BXD là cơ sở để các bên tham khảo, vận dụng phù hợp với từng gói thầu, dự án và nguồn vốn. Ảnh minh họa.

sự tương xứng với quy mô và tính phức tạp của nhiều dự án xây dựng; cấu trúc và nội dung hợp đồng còn tương đối đơn giản, chưa phản ánh đầy đủ các cơ chế quản trị hợp đồng và phân bổ rủi ro thường được áp dụng theo thông lệ quốc tế.

Bên cạnh những hạn chế về nội dung và cấu trúc, phạm vi áp dụng của các mẫu hợp đồng cũng đặt ra những vấn đề nhất định trong thực tiễn. Theo các thông tư nêu trên, việc áp dụng mẫu hợp đồng có tính chất bắt buộc đối với các dự án nhà nước và dự án sử dụng vốn nhà nước, trong khi các dự án sử dụng nguồn vốn khác được khuyến khích áp dụng. Mặc dù các bên vẫn có quyền thỏa thuận và điều chỉnh một số nội dung của hợp đồng, khả năng điều chỉnh trên thực tế vẫn chịu những giới hạn nhất định từ khuôn khổ của hợp đồng mẫu. Điều này phần nào hạn chế tính linh hoạt của các bên trong việc xây dựng các điều khoản phù hợp với đặc thù, quy mô và mức độ phức tạp của từng dự án, cũng như trong việc khắc phục những hạn chế vốn có của các mẫu hợp đồng.

2. CÁC ĐIỂM MỚI PHÁP LÝ QUAN TRỌNG CỦA BỘ HỢP ĐỒNG XÂY DỰNG MẪU MỚI

Ngày 26/6/2026, Bộ Xây dựng ban hành Quyết định 1040/QĐ-BXD giới thiệu 7 bộ mẫu hợp đồng xây dựng bao gồm: (1) Hợp đồng tư vấn lập báo cáo nghiên cứu khả thi xây dựng; (2) Hợp đồng tư vấn thiết kế xây dựng; (3) Hợp đồng tư vấn quản lý dự án; (4) Hợp đồng tư vấn giám sát thi công xây dựng; (5) Hợp đồng tư vấn khảo sát hợp đồng thi công xây dựng; (6) Hợp đồng thi công xây dựng công trình; (7) Hợp đồng xây dựng chìa khóa trao tay EPC.

Đây dường như là lần đầu tiên Bộ Xây dựng giới thiệu đồng thời một hệ thống mẫu hợp đồng xây dựng tương đối toàn diện, gồm 7 mẫu hợp đồng cho nhiều loại công việc khác nhau trong dự án xây dựng. Bên cạnh các mẫu hợp đồng phổ biến như hợp đồng tư vấn giám sát thi công, hợp đồng thi công xây dựng và hợp đồng EPC, Quyết định 1040/QĐ-BXD còn giới thiệu riêng các mẫu hợp đồng cho lập báo cáo nghiên cứu khả thi, thiết kế xây dựng, quản lý dự án và khảo sát xây dựng.

Có thể thấy bộ mẫu hợp đồng mới mang một số điểm mới pháp lý quan trọng sau đây:

Thứ nhất, khác với các mẫu hợp đồng trước đây được ban hành kèm theo Thông tư, Bộ Xây dựng lần này giới thiệu các mẫu hợp đồng dưới hình thức Quyết định, thay vì văn bản quy phạm pháp luật có tính bắt buộc. Quyết định của Bộ trưởng Bộ Xây dựng không thuộc hệ thống văn bản quy phạm pháp luật (quy định tại Điều 4 Luật ban hành văn bản quy phạm pháp luật). Theo Mục 1 phần Hướng dẫn kèm theo tại Quyết định 1040/QĐ-BXD, các mẫu hợp đồng được sử dụng làm cơ sở tham khảo và vận dụng phù hợp với từng gói thầu, dự án và nguồn vốn. Cách tiếp cận này giảm tính khuôn mẫu trong việc áp dụng, đồng thời trao cho các bên sự linh hoạt lớn hơn trong việc lựa chọn và điều chỉnh các điều khoản hợp đồng phù hợp với đặc thù của từng dự án.

Thứ hai, về bố cục, các mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD đã có bước tiến đáng chú ý khi được cấu trúc thống nhất thành 4 phần, gồm Thông tin giao dịch, Căn cứ giao kết hợp đồng, Điều kiện chung và Điều kiện cụ thể. Việc phân tách giữa Điều kiện chung và Điều kiện cụ thể tương đồng với cách tiếp cận của các mẫu hợp đồng quốc tế như

> ***Việc công bố bộ mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD có thể được xem là một bước tiến tiếp theo trong quá trình chuẩn hóa hợp đồng xây dựng tại Việt Nam, đồng thời cũng phù hợp với xu hướng đã hình thành tại nhiều thị trường xây dựng phát triển.***

FIDIC, qua đó tạo sự quen thuộc và thuận tiện hơn cho các bên, đặc biệt đối với các dự án có yếu tố nước ngoài. Về mặt soạn thảo, cấu trúc này cũng cho phép các bên tập trung thỏa thuận và điều chỉnh tại Điều kiện cụ thể những nội dung mang tính thương mại và đặc thù của từng dự án, như giá hợp đồng, thời hạn hoàn thành hay mức thưởng, phạt, trong khi các điều khoản khung được quy định tại Điều kiện chung.

Thứ ba, theo Mục 2 phần Hướng dẫn kèm theo Quyết định 1040/QĐ-BXD, các mẫu hợp đồng được xây dựng trực tiếp trên cơ sở pháp luật xây dựng Việt Nam, tham chiếu rõ ràng đến Bộ luật Dân sự 2015, Luật Xây dựng 2025 và các nghị định hướng dẫn. Do đó, các mẫu hợp đồng này về cơ bản có sự tương thích với pháp luật Việt Nam, hạn chế được rủi ro liên quan đến sự thiếu nhất quán hay không phù hợp với quy định của pháp luật Việt Nam. Đây là một ưu điểm đáng chú ý so với việc áp dụng trực tiếp các mẫu hợp đồng quốc tế.

Thứ tư, một điểm mới đáng chú ý của Quyết định 1040/QĐ-BXD là việc xây dựng riêng các mẫu hợp đồng tư vấn tương ứng với từng loại dịch vụ và giai đoạn của dự án, bao gồm lập báo cáo nghiên cứu khả thi, thiết kế, quản lý dự án, giám sát thi công và khảo sát xây dựng. Việc chuyên biệt hóa các mẫu hợp đồng giúp xác định cụ thể hơn phạm vi công việc, quyền và nghĩa vụ của các bên, cũng như hồ sơ và thủ tục nghiệm thu phù hợp với đặc thù của từng dịch vụ tư vấn và giai đoạn của dự án xây dựng. Cách tiếp cận này cụ thể hơn so với mẫu hợp đồng tư vấn xây dựng tại khoản 1 Điều 1 Thông tư 08/2016/TT-BXD, vốn sử dụng một mẫu hợp đồng tư vấn chung cho các loại công việc tư vấn xây dựng.

Tuy nhiên, mức độ chuyên biệt hóa tương tự chưa được thể hiện đối với hoạt động thi công xây dựng. Quyết định 1040/QĐ-BXD chưa xây dựng các mẫu hợp đồng thi công riêng tương ứng với cơ chế phân bổ rủi ro khác nhau, tùy thuộc vào phạm vi công việc, vai trò và mức độ trách nhiệm của chủ đầu tư và nhà thầu.

Thứ năm, bên cạnh sự kiện bất khả kháng, các mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD còn bổ sung cơ chế xử lý trường hợp hoàn cảnh thay đổi cơ bản, phù hợp với khoản 2 Điều 13 Luật Xây dựng năm 2025 và Điều 18 Nghị định 210/2026/NĐ-CP. Việc bổ sung cơ chế này đáp ứng yêu cầu thực tế đối với các dự án xây dựng, vốn có thời gian thực hiện kéo dài và có thể chịu ảnh hưởng của những biến động về kinh tế, chính sách hoặc điều kiện thực hiện dự án. Theo đó, các quy định về thông báo, đánh giá mức độ ảnh hưởng và đề xuất sửa đổi hợp đồng khi xảy ra hoàn cảnh thay đổi cơ bản được cụ thể hóa trong mẫu hợp đồng. Việc ghi nhận cơ chế này bên cạnh bất khả kháng giúp có thêm cơ sở xử lý những biến động kháng quan trong quá trình thực hiện hợp đồng, qua đó nâng cao khả năng quản trị rủi ro và hạn chế tranh chấp.

Thứ sáu, các bộ mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD có thể được vận dụng linh hoạt mà không nhất thiết giới hạn trong loại hoạt động xây dựng tương ứng với tên gọi của từng mẫu. Theo Mục 5.2 phần Hướng dẫn kèm theo Quyết định 1040/QĐ-BXD, đối với các loại hợp đồng như EP, EC, PC và các loại hợp đồng xây dựng khác chưa có mẫu riêng, các bên có thể tham khảo, vận dụng và điều chỉnh các mẫu hợp đồng được công bố để xác lập hợp đồng phù hợp với điều kiện cụ thể của từng gói thầu và yêu cầu quản lý. Cách tiếp cận này góp phần mở rộng khả năng vận dụng bộ mẫu trong thực tiễn, đồng thời bảo đảm tính linh hoạt đối với các loại hợp đồng có phạm vi công việc khác nhau.

3. KHẢ NĂNG VẬN DỤNG HỢP ĐỒNG MẪU MỚI VỚI MẪU HỢP ĐỒNG THEO THÔNG LỆ QUỐC TẾ

Cơ sở áp dụng bộ mẫu hợp đồng xây dựng được soạn thảo theo thông lệ quốc tế đã được quy định từ lâu, qua các Điều 52.3 Nghị định 48/2010/NĐ-CP, Điều 54.3 Nghị định 37/2015/NĐ-CP và tiếp tục được ghi nhận tại Điều 34.3 Nghị định 210/2026/NĐ-CP.

Theo đó, bên cạnh các mẫu hợp đồng do Bộ Xây dựng ban hành, pháp luật Việt Nam cũng mở ra cơ sở cho việc tham khảo và vận dụng các mẫu hợp đồng phổ biến theo thông lệ quốc tế, phù hợp với tính chất và yêu cầu của từng dự án. Trong số đó, các mẫu hợp đồng do Hiệp hội Quốc tế các Kỹ sư Tư vấn (FIDIC) ban hành là một trong những hệ thống hợp đồng tiêu chuẩn dường như là phổ biến và thông dụng nhất trên thực tiễn.

Việc vận dụng các mẫu hợp đồng theo thông lệ quốc tế, đặc biệt là FIDIC, có thể mang lại nhiều lợi ích cho các dự án xây dựng có quy mô lớn, tính chất phức tạp hoặc có yếu tố nước ngoài. Trước hết, việc sử dụng một cấu trúc hợp đồng quen thuộc và được thừa nhận rộng rãi trên thị trường quốc tế có thể tạo thuận lợi cho sự tham gia của nhà đầu tư, nhà thầu và các chủ thể nước ngoài bao gồm cả bên tài trợ dự án, khi các bên đã có sự hiểu biết nhất định về cấu trúc hợp đồng, cách thức quản lý và phân bổ rủi ro. Sự quen thuộc này góp phần giảm những khác biệt và rào cản về khuôn khổ hợp đồng khi tham gia các dự án tại Việt Nam, qua đó tạo thuận lợi cho sự tham gia của các chủ thể nước ngoài vào các dự án xây dựng, qua đó thu hút nguồn lực và đầu tư nước ngoài vào hoạt động xây dựng tại Việt Nam.

Thêm vào đó, các mẫu FIDIC đã được xây dựng và hoàn thiện qua nhiều phiên bản trên cơ sở thực tiễn triển khai các dự án xây dựng. Đặc biệt, các mẫu FIDIC được xây dựng với

những cơ chế phân bổ rủi ro khác nhau tùy thuộc vào mô hình thực hiện dự án, vai trò và mức độ trách nhiệm của chủ đầu tư, nhà thầu trong thiết kế và thi công, như Sách Đỏ (Các điều kiện của hợp đồng xây dựng do Chủ đầu tư thiết kế), Sách Vàng (Các điều kiện của hợp đồng thiết kế và xây dựng Nhà thầu thiết kế), Sách Bạc (Các điều kiện hợp đồng cho dự án chìa khóa trao tay EPC), Sách Trắng (Mẫu hợp đồng dịch vụ tư vấn)…

Tuy nhiên, các mẫu hợp đồng xây dựng quốc tế, như FIDIC, được xây dựng nhằm đáp ứng thực tiễn của các dự án xây dựng quốc tế và không được thiết kế riêng cho pháp luật Việt Nam. Do đó, khi áp dụng tại Việt Nam, một số cơ chế của FIDIC có thể chưa hoàn toàn tương thích với pháp luật trong nước, chẳng hạn như vấn đề nghiệm thu công trình, vai trò và thẩm quyền của nhà tư vấn, thủ tục khiếu nại, cũng như cơ chế xác định và bồi thường thiệt hại. Do đó, việc áp dụng nguyên mẫu hợp đồng theo thông lệ quốc tế có thể làm phát sinh rủi ro về tính hiệu lực hoặc khả năng thực thi của một số điều khoản nếu không được điều chỉnh phù hợp với pháp luật Việt Nam.

Chính sự khác biệt này đặt ra yêu cầu cân bằng giữa việc tiếp nhận những ưu điểm của các mẫu hợp đồng quốc tế và bảo đảm sự tương thích với khuôn khổ pháp luật trong nước. Yêu cầu điều chỉnh mẫu hợp đồng quốc tế cho phù hợp với pháp luật Việt Nam được quy định tại khoản 3 Điều 54 Nghị định 37/2015/NĐ-CP và tiếp tục được quy định tại khoản 3 Điều 34 Nghị định 210/2026/NĐ-CP. Đây là cơ sở để cân nhắc khả năng vận dụng kết hợp, thay vì đặt các mẫu hợp đồng trong nước và các mẫu hợp đồng quốc tế ở hai lựa chọn loại trừ lẫn nhau.

Nhìn chung, các mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD và FIDIC không nhất thiết loại trừ lẫn nhau mà có thể bổ trợ cho nhau trong thực tiễn giao kết hợp đồng xây dựng. Trong khi Quyết định 1040/QĐ-BXD cung cấp khuôn khổ hợp đồng phù hợp với pháp luật Việt Nam, FIDIC có lợi thế về tính chuẩn hóa quốc tế và sự đa dạng của các mô hình hợp đồng cũng như mức độ chi tiết của các cơ chế quản trị hợp đồng và phân bổ rủi ro và quan trọng hơn là được chấp nhận bởi các bên tài trợ dự án. Với tính chất tham khảo và vận dụng linh hoạt của bộ mẫu mới, các bên có thể tham khảo và kết hợp những ưu điểm của cả hai hệ thống để xây dựng hợp đồng phù hợp với đặc thù của từng dự án, đồng thời hài hòa giữa thông lệ quốc tế và yêu cầu tuân thủ pháp luật Việt Nam.

4. KẾT LUẬN VÀ MỘT SỐ KHUYẾN NGHỊ

Việc công bố bộ mẫu hợp đồng theo Quyết định 1040/QĐ-BXD có thể được xem là một bước tiến tiếp theo trong quá trình chuẩn hóa hợp đồng xây dựng tại Việt Nam, đồng thời cũng phù hợp với xu hướng đã hình thành tại nhiều thị trường xây dựng phát triển. Trên thực tế, nhiều quốc gia vẫn xây dựng các hệ thống hợp đồng mẫu phù hợp với pháp luật và đặc thù thị trường trong nước, như VOB/B tại Đức, CCAG Travaux cho lĩnh vực công và NF P 03-001 cho lĩnh vực tư tại Pháp, hay PSSCOC tại Singapore cho các dự án xây dựng thuộc khu vực công, bao gồm hợp đồng thi công xây dựng, thiết kế và thi công, cùng các mẫu dành cho dự án quy mô nhỏ. Các bộ mẫu hợp đồng nội địa thường không nhất thiết loại trừ khả năng áp dụng mẫu hợp đồng quốc tế. Như tại Singapore, bên cạnh PSSCOC, việc áp dụng bộ mẫu hợp đồng NEC4. Kinh nghiệm này cho thấy giá trị của chuẩn hóa không nằm ở việc tìm kiếm một bộ hợp đồng duy nhất cho mọi dự án, mà ở việc thiết lập một khuôn khổ đủ thống nhất nhưng vẫn có khả năng thích ứng với pháp luật và đặc thù của từng dự án.

Từ góc độ đó, việc Quyết định 1040/QĐ-BXD xác định các mẫu hợp đồng là cơ sở để tham khảo và vận dụng, thay vì áp dụng cứng nhắc, là một điểm đáng chú ý. Điều này cũng tạo điều kiện cho các bên kết hợp bộ mẫu theo Quyết định 1040/QĐ-BXD, vốn được xây dựng phù hợp với pháp luật Việt Nam, với các mẫu hợp đồng theo thông lệ quốc tế, vốn có lợi thế về tính chuẩn hóa phù hợp thực tiễn dự án quốc tế cũng như phù hợp cho thực tiễn tài trợ dự án quốc tế. Sự kết hợp này có thể giúp các bên phát huy ưu điểm và bổ sung những hạn chế của từng bộ mẫu, qua đó xây dựng hợp đồng vừa phù hợp với pháp luật Việt Nam, vừa tiếp thu được những cơ chế và thông lệ đã được chuẩn hóa theo thông lệ quốc tế.

Tuy nhiên, chính tính linh hoạt này cũng đòi hỏi các bên phải thận trọng trong việc lựa chọn và điều chỉnh mẫu hợp đồng. Việc lựa chọn mẫu hợp đồng phù hợp cần xuất phát từ loại và quy mô dự án, phương thức thực hiện, nguồn vốn, trách nhiệm thiết kế và thi công, pháp luật áp dụng và cách thức phân bổ rủi ro mà các bên mong muốn. Trên cơ sở đó, các bên có thể sử dụng mẫu theo Quyết định 1040/QĐ-BXD làm nền tảng phù hợp với pháp luật Việt Nam, đồng thời tham khảo có chọn lọc các mẫu hợp đồng của các Hiệp hội nghề nghiệp có uy tín (như FIDIC, NEC) trong việc quản trị và phân bổ rủi ro khi phù hợp với dự án. Suy cho cùng, hợp đồng mẫu nên là điểm khởi đầu cho quá trình xây dựng một hợp đồng phù hợp, thay vì là giải pháp có thể áp dụng nguyên trạng cho mọi dự án.❖

Các tác giả xin cảm ơn ông Đặng Quang Huy - trợ lý luật sư tại Công ty Luật TNHH Nishimura & Asahi (Nhật Bản), đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện bài viết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. Bộ Xây dựng, Thông tư 08/2011/TT-BXD, Điều 2.
2. Bộ Xây dựng, Thông tư 09/2011/TT-BXD, Điều 2.
3. Bộ Xây dựng, Thông tư 08/2016/TT-BXD, Điều 1.
4. Bộ Xây dựng, Thông tư 09/2016/TT-BXD, Điều 1.
5. Bộ Xây dựng, Thông tư 02/2025/TT-BXD, điểm b Mục 1.2 Phần 1.
6. Báo Đấu thầu, "Rà soát khó khăn, vướng mắc trong thực hiện hợp đồng xây dựng", ngày 30/8/2024.
7. "Nhiều nhầm lẫn cần tránh trong áp dụng hợp đồng FIDIC", ngày 20/3/2020.
8. Lexology, "Construction contracts in Germany".
9. Country Comparative Guides, "France: Construction", Mục 8.
10. Building and Construction Authority (Singapore), "Public Sector Standard Conditions of Contract (PSSCOC)".
11. Building and Construction Authority (Singapore), "NEC4 contract".

Triển khai trạm sạc xe điện từ **thiết kế** đến **vận hành**



THANH NGA

Từ tầng hầm chung cư đến trạm dừng nghỉ cao tốc, mỗi vị trí đặt trạm sạc đặt ra yêu cầu riêng về an toàn, thiết kế, kiểm tra sau lắp đặt và vận hành.

Khi bố trí khu sạc trong tầng hầm chung cư, chủ đầu tư cần biết trụ sạc phải đáp ứng yêu cầu kỹ thuật nào và công trình hiện hữu phải được kiểm tra những gì? Tại một trạm dừng nghỉ đang khai thác, câu hỏi lại khác: Nếu lắp thêm trụ dùng chung hệ thống điện, phần hạ tầng nào có thể tiếp tục sử dụng, phần nào phải kiểm tra lại? Nếu tăng công suất đến mức phải thay đổi phương án cấp điện, hồ sơ và phạm vi nghiệm thu cần bổ sung những gì?... Đó là những vấn đề mà chủ đầu tư, đơn vị thiết kế và đơn vị vận hành phải xử lý, từ xác định yêu cầu đối với trụ sạc lắp trong công trình đến kiểm tra khả năng sạc của xe và đối chiếu số tiền khách hàng phải trả.

LÀM RÕ YÊU CẦU ĐỐI VỚI TRỤ SẠC LẮP TRONG CÔNG TRÌNH

Một điểm được đề cập nhiều là phạm vi áp dụng của QCVN 32:2026/BCT. Quy chuẩn loại trừ trạm sạc bố trí bên trong công trình xây dựng, trong đó có tầng hầm, nhà để xe và các không gian được kết cấu xây dựng bao che một phần hoặc toàn bộ. Khi lập hồ sơ cho khu sạc ở những vị trí này, cần làm rõ hai việc: căn cứ lựa chọn và đánh giá hợp quy đối với trụ sạc dự kiến lắp, và các yêu cầu về xây dựng, phòng cháy, chữa cháy đối với phần công trình.

Với công trình hiện hữu, câu hỏi là khi bổ sung khu sạc vào tầng hầm đang sử dụng, phải kiểm tra những hạng mục nào và dựa vào đâu để đánh giá hệ thống thông gió, thoát khói, lối thoát nạn và điều kiện tiếp cận chữa cháy. Các ý kiến tại hội thảo đề nghị hướng dẫn theo loại công trình, quy mô khu sạc và điều kiện hiện trạng.

Với trạm đang khai thác, các trường hợp thay trụ tương đương, lắp thêm trụ dùng chung hạ tầng điện hoặc tăng công suất cần được hướng dẫn về phạm vi cập nhật hồ sơ, kiểm tra và nghiệm thu bổ sung.

Mở đầu chuyên đề, PGS.TS Tạ Tuấn Hưng (Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải) phân tích các yêu cầu an toàn trong QCVN 32:2026/BCT và đề nghị sớm có hướng dẫn riêng cho hạ tầng sạc ở tầng hầm chung cư, tòa nhà hỗn hợp.

TÍNH CHỖ SẠC, CHỖ CHỜ VÀ NGUỒN ĐIỆN NGAY TỪ THIẾT KẾ

Một trạm dừng nghỉ có thể còn khả năng cấp điện nhưng vẫn ùn ứ nếu các vị trí sạc đều có xe, trong khi xe đến sau thiếu chỗ chờ. Khi lập phương án mặt bằng, cần tính số xe đến vào giờ cao điểm, thời gian xe chiếm chỗ và khả năng hàng xe chờ ảnh hưởng đến đường chính. Với dự án mới, vị trí sạc, chỗ chờ, lối ra vào, vị trí công trình điện và phần diện tích dành cho mở rộng cần được xem xét cùng nhau ngay từ khi thiết kế.

Đối với trạm đang khai thác, vướng mắc có thể nằm ở quỹ đất, khả năng cấp điện hoặc hợp đồng khai thác. Có nơi phải mở rộng bãi đỗ hoặc điều chỉnh phương án đầu tư mới bố trí được khu sạc. Vì vậy, cần rà soát theo từng trạm, ghi rõ việc còn thiếu, nguyên nhân, đầu mối xử lý và tiến độ dự kiến.

Cấp điện là phần việc cần bàn từ bước lập dự án. Ở những trạm xa lưới điện hiện hữu, chi phí kéo đường dây và xây dựng trạm biến áp có thể lớn, trong khi nhu cầu sạc tập trung vào cuối tuần hoặc ngày lễ. Nếu chỉ cộng công suất danh định của các trụ để xác định công suất đấu nối, phương án đầu tư có thể vượt nhu cầu thường xuyên. Nếu chốt mặt bằng và quy mô trạm rồi mới làm việc về cấp điện, dự án có thể phải điều chỉnh thiết kế.

Việc làm rõ đầu mối tiếp nhận nhu cầu đấu nối, dữ liệu để thỏa thuận công suất và phần hạ tầng do từng bên đầu tư. Trong bài thứ hai, PGS.TS Nguyễn Văn Nghĩa (Trường Đại học Giao thông vận tải) phân tích cách tính đồng thời công suất



cấp điện, luồng xe, mặt bằng và an toàn cháy, đồng thời nêu các vướng mắc về thẩm định, nghiệm thu phần công trình.

KIỂM TRA SAU LẮP ĐẶT VÀ ĐỐI CHIẾU TỪNG PHIÊN SẠC

Một đầu nối cắm vừa với xe vẫn có thể chưa khởi tạo được phiên sạc. Nguyên nhân có thể nằm ở chế độ sạc, giao tiếp giữa xe và trụ, phần mềm hoặc điều kiện xác thực dịch vụ. Khi kiểm tra khả năng tương thích kỹ thuật, vấn đề cần xác định là xe và trụ có thể khởi tạo, duy trì và kết thúc phiên sạc an toàn trong cấu hình đã công bố hay không. Việc kiểm tra cũng được đặt ra khi có thay đổi phần mềm ảnh hưởng đến khả năng tương thích. Với người sử dụng, trạm cần công bố rõ xe hoặc cấu hình được hỗ trợ và thông tin về điều kiện xác thực, sử dụng dịch vụ, thanh toán.

Ông Trần Duy Tài (Ban Tiêu chuẩn, Ủy ban Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Quốc gia, Bộ KH&CN) phân biệt thử mẫu thiết bị với kiểm tra hệ thống cấp điện tại trạm sau lắp đặt. Từ rà soát 41 tiêu chuẩn quốc gia về sạc xe điện, tác giả đề xuất ưu tiên cập nhật tiêu chuẩn sạc một chiều và xây dựng hướng dẫn kiểm tra tại trạm, làm rõ ai kiểm tra, kiểm tra khi nào và cần có kết quả gì khi nghiệm thu.

Khi trạm đi vào hoạt động, số điện đo tại điểm giao nhận giữa đơn vị điện lực và đơn vị vận hành phục vụ một giao dịch. Số điện đo trong từng phiên sạc phục vụ việc tính tiền dịch vụ cho khách hàng. Với thiết bị đo điện năng sạc pin xe điện, các ý kiến tại hội thảo đề nghị làm rõ việc phê duyệt mẫu, kiểm định và cách xử lý sau sửa chữa, thay thế hoặc cập nhật phần mềm có thể ảnh hưởng đến kết quả đo.

Nếu số điện trên trụ khác số hiển thị trên ứng dụng, đơn vị vận hành cần đối chiếu kết quả đo với dữ liệu dùng để tính tiền của cùng một phiên sạc. Mã phiên, lượng điện năng, thời gian sạc, đơn giá hoặc cách tính giá và tổng số tiền là những thông tin được đề xuất để phục vụ đối soát. Việc bảo vệ kết quả đo và lưu dấu những thay đổi có ảnh hưởng đến dữ liệu thanh toán cũng cần được tính đến. Ông Trần Đức Tùng (Ban Đo lường, Ủy ban Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Quốc gia, Bộ KHCN) đi sâu vào yêu cầu đối với thiết bị đo và căn cứ để giải thích cho khách hàng khi có chênh lệch.

Ngày 07/11/2026, Tạp chí Xây dựng đã tổ chức Hội thảo khoa học "Triển khai quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về trụ sạc, trạm sạc xe điện: Yêu cầu kỹ thuật và thực tiễn phát triển hạ tầng sạc giao thông đường bộ" với sự tham gia của các cơ quan quản lý, nhà khoa học và doanh nghiệp đầu tư hạ tầng.

ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ PIN LƯU TRỮ PHẢI TÍNH THEO NHU CẦU SẠC

Khép lại chuyên đề, PGS.TS Lê Văn Nghĩa (Đại học Bách khoa Hà Nội) phân tích cách phối hợp điện lưới, điện mặt trời và pin lưu trữ. Tác giả đề nghị khảo sát nhu cầu sạc và khả năng đấu nối trước khi chọn công suất điện mặt trời, dung lượng pin và số cổng sạc. Khi so sánh các phương án, cần tính cả chi phí trong thời gian khai thác, thời gian chờ và lượng điện thực sự cấp cho xe.

Từ lúc chọn vị trí đặt trụ đến khi tính tiền từng phiên sạc, mỗi quyết định đều cần dữ liệu và căn cứ kiểm tra cụ thể. Những việc được các tác giả đặt ra, từ hướng dẫn bố trí khu sạc trong tầng hầm đến kiểm tra sau lắp đặt và đối soát tiền sạc, cũng là những việc cần làm rõ để chủ đầu tư và đơn vị vận hành có căn cứ thực hiện.❖

An toàn trụ sạc, trạm sạc xe điện trong QCVN 32:2026/BCT



PGS.TS TẠ TUẤN HƯNG*

Bộ Công Thương đã ban hành QCVN 32:2026/BCT về trụ sạc và trạm sạc xe điện. Những vấn đề an toàn được quy định khá rõ ràng. Có những vấn đề cần được hiểu rõ lưu ý khi triển khai QCVN này.

SỰ CẦN THIẾT BAN HÀNH QCVN 32:2026/BCT

Trong những năm gần đây, xe điện đã có sự phát triển mạnh mẽ về số lượng và chất lượng. Xe điện không còn là phương tiện thay thế cho phương tiện sử dụng năng lượng hóa thạch đang trở thành lựa chọn ưu tiên ở một số quốc gia, trong đó có Việt Nam.

Tính đến hết năm 2025, chỉ riêng hãng Vinfast cũng đã trang bị khoảng 150.000 cổng sạc phủ rộng ở tất cả các tỉnh, thành trong cả nước (Theo vnexpress.net). Ngoài ra, còn đang có sự tham gia của nhiều doanh nghiệp xây dựng các trạm sạc khác như VETC, Charger+, EV One, TMT Motors…

Với sự phát triển nhanh về số lượng trụ sạc và trạm sạc, thì cần ban hành các Tiêu chuẩn quốc gia (TCVN) và Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN) để đảm bảo an toàn sức khỏe cho con người, bảo vệ môi trường và nâng cao năng lực cạnh tranh quốc gia. Một số tiêu chuẩn kỹ thuật về hệ thống sạc xe điện được thể hiện trong bảng sau:

Có thể nhận thấy, các TCVN về trạm sạc, trụ sạc và các thiết bị trên xe điện đã khá đầy đủ. Bên cạnh các tiêu chuẩn, việc đầu tư, lắp đặt và vận hành trạm sạc xe điện tại Việt Nam đang được quản lý bởi các QCVN của nhiều lĩnh vực chuyên ngành như: QCVN 25:2025/BCT (về an toàn điện); QCVN 26:2025/BCT (về kỹ thuật điện - hệ thống lưới điện); QCVN 06:2022/BXD và Sửa đổi 1:2023 (về an toàn cháy cho nhà và công trình), QCVN 10:2025/BCA (về trang bị, bố trí phương tiện phòng cháy chữa cháy (PCCC), cứu nạn, cứu hộ cho nhà và công trình) ...

QCVN 32:2026/BCT-Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về trụ sạc, trạm sạc xe điện được ban hành kèm theo Thông tư số 61/2026/TT-BCT ngày 29/9/2026. Có thể thấy QCVN này sẽ giải quyết khoảng trống về pháp lý bằng cách thiết lập các yêu cầu tối thiểu bắt buộc và đồng bộ từ trụ sạc đến trạm sạc. Đồng thời, kết nối hài hòa mà không làm phát sinh thêm thủ tục hành chính chồng chéo hay thay thế thẩm quyền quản lý của các chuyên ngành liên quan.

CÁC YẾU TỐ AN TOÀN ĐƯỢC QUY ĐỊNH ĐỐI VỚI TRỤ SẠC, TRẠM SẠC

Trụ sạc lắp đặt trong trạm sạc tối thiểu phải có 4 nhóm chức năng bảo vệ an toàn: (1) Bảo vệ quá dòng điện, quá điện áp và thấp điện áp; (2) Bảo vệ ngắn mạch; (3) Bảo vệ theo dòng điện dư phù hợp tiêu chuẩn và cấu hình lắp đặt; và (4) Tự động ngắt khi xảy ra sự cố được quy định trong Điều 3.3.3.

Mã TCVN	Mã TCQT tham khảo	Tên TCVN
TCVN 12775:2020	ISO18246: 2015	Mô tô và xe máy điện - Yêu cầu an toàn đối với đấu nối với nguồn cấp điện từ bên ngoài
TCVN 13078-1:2020	IEC 61851-1:2017	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - Phần 1: Yêu cầu chung
TCVN 13078-21-1:2020	IEC 61851-21-1:2012	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - Phần 21-1: Yêu cầu tương thích điện từ của bộ sạc lắp trên xe điện kết nối có dây với nguồn cấp điện xoay chiều/một chiều
TCVN 13078-21-1:2020	IEC 61851-21-2:2012	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - Phần 21-1: Yêu cầu tương thích điện từ của bộ sạc lắp trên xe điện kết nối có dây với nguồn cấp điện xoay chiều/một chiều
TCVN 13078-23:2020	IEC61851-23: 2014	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - phần 23: Trạm sạc điện một chiều cho xe điện
TCVN 13078-24:2020	IEC61851-24: 2014	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - Phần 25: Thiết bị cấp điện một chiều cho xe điện có bảo vệ dựa trên phân cách về điện
TCVN 13078-25:2023	IEC61851-25: 2014	Hệ thống sạc điện có dây dùng cho xe điện - Phần 25: Thiết bị cấp điện một chiều cho xe điện có bảo vệ dựa trên phân cách về điện
TCVN 12671-1:2019	IEC 62893-1:2017	Cáp sạc dùng cho xe điện có điện áp danh định đến và bằng 0,6/1 kV - Phần 1: Yêu cầu chung
TCVN 12671-2:2019	IEC 62893-2:2017	Cáp sạc dùng cho xe điện có điện áp danh định đến và bằng 0,6/1kV - Phần 2: Phương pháp thử nghiệm
TCVN 12671-3:2019	IEC 62893-3:2017	Cáp sạc dùng cho xe điện có điện áp danh định đến và bằng 0,6/1kV - Phần 3: Cáp sạc điện xoay chiều theo các chế độ 1, 2 và 3 của IEC 61851-1 có điện áp danh định đến và bằng 450/750 V
TCVN 7447-7-722:2023	IEC 60364-7-722:2018	Quy định yêu cầu đối với hệ thống lắp đặt điện hạ áp cho khu vực đặc biệt - Nguồn cấp cho xe điện.
TCVN 13724-7:2023	IEC 61439-7:2022	Quy định yêu cầu đối với cụm đóng cắt và điều khiển hạ áp dùng cho các ứng dụng đặc biệt, bao gồm trạm sạc xe điện.

(*) *Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải*

An toàn chống điện giật và bảo vệ điện tích hợp điện trên trụ sạc được dẫn chiếu đến Điều 8 và bảo vệ quá tải, ngắn mạch tại Điều 13 của TCVN 13078-1:2020 (IEC 61851-1:2017). Trụ sạc phải đáp ứng yêu cầu miễn nhiễm theo Điều 5 và phát xạ điện từ theo Điều 6 của TCVN 13078-21-2:2020, đồng thời tuân thủ quy chuẩn vô tuyến điện nếu tích hợp thu phát sóng vô tuyến.

Điều 3.6.3 của QCVN32:2026/BCT quy định đối với trụ sạc DC, thiết bị phải đáp ứng bổ sung các yêu cầu an toàn về cách điện, dòng một chiều và theo dõi nhiệt độ tại TCVN 13078-23:2020 (IEC 61851-23:2014).

An toàn giao diện dẫn điện, cụm cáp sạc được quy định dẫn chiếu từ Điều 9, Điều 10 và Điều 11 của TCVN 13078-1:2020. Điều 3.3.9 có quy định bộ phận giữ cáp và đầu nối trên trụ phải được bố trí để bảo vệ cáp khỏi hư hỏng cơ khí và giữ cho cáp không chắn ngang lối đi khi không sử dụng.

Điều 3.3.7 quy định kết cấu trụ sạc phải vượt qua các phép thử theo Điều 12 của TCVN 13078-1:2020; Cấp bảo vệ của trụ sạc lắp ngoài trời phải đáp ứng yêu cầu tại mục 2.2, điều kiện môi trường trong hồ sơ thiết kế và hướng dẫn lắp đặt của nhà sản xuất; phải được đối chiếu với nhãn và hồ sơ thử nghiệm của sản phẩm. Điều 3.3.10 quy định bệ móng, bản mã, bu lông neo và chi tiết liên kết của trụ sạc phải phù hợp kích thước chân đế thực tế của thiết bị; bu lông, đai ốc, nắp chụp và chi tiết lộ thiên phải có giải pháp chống gỉ, chống ăn mòn phù hợp với điều kiện ngoài trời.

Điều 3.2.1 quy định trạm sạc xe điện cần đáp ứng được các quy định về vị trí trạm sạc không được cản trở lối ra vào, lối thoát nạn, đường dành cho xe chữa cháy, khả năng tiếp cận của phương tiện ứng cứu và người đi bộ. Điều 1.5.8 quy định phần diện tích dành cho phương tiện dừng, đỗ để thực hiện hoạt động sạc, bao gồm vạch sơn, bậc chặn bánh, không gian thao tác, không gian tiếp cận đầu nối và khoảng an toàn cần thiết.

Điều 3.2.7 chỉ rõ bề mặt khu vực sạc phải chịu được tải trọng của phương tiện và thiết bị. Điều 3.2.1 quy định trạm sạc ngoài trời phải thiết kế độ dốc và giải pháp thoát nước chống đọng nước tại chân bệ móng, tủ điện và điểm đấu nối.

Điều 3.5.1 quy định hệ thống cấp điện cho trạm sạc xe điện phải được thiết kế, lắp đặt và vận hành tuân thủ QCVN 25:2025/BCT và QCVN 26:2025/BCT; tủ điện phân phối chính và vỏ thiết bị điện phải có độ bền cơ học, chịu nhiệt, chống cháy và cấp bảo vệ phù hợp môi trường; cụm đóng cắt và điều khiển hạ áp phải đáp ứng TCVN 13724-7:2023.

Điểm 3 của Điều 3.5.3 quy định mạch cấp điện cho trụ sạc phải có thiết bị bảo vệ dòng điện dư (RCD) phù hợp TCVN 7447-7-722:2023 (sử dụng RCD kiểu B đạt IEC 62423:2009 hoặc tổ hợp RCD với RDC-DD đạt IEC 62955:2018).

Thiết bị bảo vệ quá dòng, ngắn mạch phải phối hợp cắt chọn lọc phần sự cố và duy trì bảo vệ dự phòng; trang bị thiết bị bảo vệ chống quá điện áp quá độ do sét theo đánh giá rủi ro. (Điểm 5, điều 3.5.3). Trạm sạc phải có giải pháp kỹ thuật phát hiện, cảnh báo, cô lập và ngắt điện tự động hoặc thủ công khi xảy ra cháy, chạm đất, va chạm, nước ngập, quá nhiệt, hư hỏng cách điện hoặc sự cố nghiêm trọng khác (Điều 3.1.4). Phải bố trí thiết bị hoặc cơ cấu thao tác ngắt điện khẩn cấp tại vị trí dễ tiếp cận, có ký hiệu rõ ràng, được bảo vệ tránh thao tác ngoài ý muốn nhưng không cản trở khi khẩn cấp (Điều 3.4.1).

Khi phát hiện nước ngập, hư hỏng cách điện, vỏ thiết bị nứt vỡ, cáp hở lõi, đầu nối quá nhiệt, phương tiện PCCC không đạt yêu cầu hoặc thiết bị bảo vệ mất tác dụng, phải dừng và cô lập ngay thiết bị/khu vực bị ảnh hưởng (Điều 3.4.10).

Trang bị, bố trí phương tiện PCCC và cứu nạn, cứu hộ tuân thủ QCVN 06:2022/BXD (và Sửa đổi 1:2023), QCVN 10:2025/BCA và TCVN 3890:2023. (Điều 3.4.6). Phương tiện chữa cháy tại chỗ đặt ngoài trời phải được bảo vệ khỏi tác động môi trường, dễ nhận biết và tiếp cận khi có sự cố; (Điều 3.4.7). Niêm yết đầy đủ nội quy, tiêu lệnh chữa cháy, biển cảnh báo an toàn điện, hướng dẫn sử dụng và thông tin liên hệ khẩn cấp tại vị trí dễ nhìn, bền với môi trường (Điều 3.4.8).

Hệ thống giám sát cấp điện phải thu thập tối thiểu các thông tin sau: trạng thái đóng cắt của hệ thống cấp điện trạm sạc, tín hiệu bảo vệ, điện áp, dòng điện, công suất tác dụng, công suất phản kháng, hệ số công suất và thông tin đo lường điện năng (Điểm 1, Điều 3.6.4). Trường hợp mất kết nối, lỗi phần mềm, lỗi thanh toán, nghi ngờ truy cập trái phép hoặc sự cố an ninh mạng có nguy cơ ảnh hưởng đến an toàn sạc, đo lường, thanh toán hoặc dữ liệu của người sử dụng, đơn vị vận hành phải cô lập phần bị ảnh hưởng, xử lý, khôi phục hoạt động và lưu hồ sơ sự cố (Điểm 2, Điều 3.6.7).

MỘT SỐ VẤN ĐỀ KỸ THUẬT VÀ KHUYẾN NGHỊ KHI TRIỂN KHAI QCVN 32:2026/BCT

Mục 1.3.3 và Mục 3.3.5 quy định trạm sạc phải đảm bảo khả năng kỹ thuật để dùng chung cho các phương tiện giao thông đường bộ chạy điện có cổng sạc tương thích với loại đầu nối, chế độ sạc và cấu hình kỹ thuật mà trạm hỗ trợ. Như vậy, QCVN này sẽ mở ra cho khả năng dùng chung hệ thống hạ tầng sạc cho các loại xe của các hãng khác nhau. Điều này cần sự thống nhất, nỗ lực của các bên liên quan.

Điều 1.1.5.1 có quy định không áp dụng QCVN 32:2026/BCT cho trạm sạc được bố trí trong phạm vi bên trong công trình xây dựng, bao gồm: các tầng hầm, tầng nửa hầm và tầng trên mặt đất; trong nhà để xe, khu vực đỗ xe trong nhà và các không gian khác được bao che một phần hoặc toàn bộ bởi các kết cấu xây dựng. Như vậy, các chủ đầu tư trạm sạc tại tầng hầm của tòa nhà hỗn hợp/chung cư không dùng QCVN này để chứng nhận mà phải tuân theo các quy chuẩn PCCC và xây dựng chuyên ngành. Cho nên, đề nghị các cơ quan quản lý sớm nghiên cứu hướng dẫn hoặc xây dựng quy định riêng cho hạ tầng sạc xe điện đặt tại tầng hầm của tòa nhà hỗn hợp/chung cư để đảm bảo đồng bộ về an toàn PCCC. Cơ quan quản lý cần sớm xây dựng hệ thống quản lý dữ liệu số hóa kết nối các trạm sạc công cộng nhằm hỗ trợ quy hoạch lưới điện và giám sát an toàn vận hành trên phạm vi toàn quốc.

Đối với chủ đầu tư và đơn vị vận hành trạm sạc cần đảm bảo tất cả trụ sạc đưa vào lắp đặt đều đã được chứng nhận hợp quy. Cần xây dựng quy trình vận hành chi tiết, đào tạo nhân sự về an toàn điện, PCCC và định kỳ diễn tập xử lý tình huống khẩn cấp.

Đối với nhà sản xuất, lắp ráp và nhập khẩu trụ sạc cần đảm bảo ngôn ngữ hiển thị trên màn hình trụ sạc và toàn bộ tài liệu hướng dẫn lắp đặt, vận hành, bảo trì đều bằng tiếng Việt chính xác.

Thiết kế trạm sạc xe điện cần tính từ **cấp điện** đến **mặt bằng**



PGS.TS NGUYỄN VĂN NGHĨA*

Thiết kế trạm sạc xe điện cần tính đồng thời công suất cấp điện, luồng xe ra vào và an toàn cháy. Việc lắp trụ trong tầng hầm vẫn cần hướng dẫn riêng.

THIẾT KẾ TRẠM SẠC TỪ CÔNG SUẤT ĐẾN MẶT BẰNG

Tại Hội nghị COP26, Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050; Quyết định 876/QĐ-TTg xác định lộ trình từ 2040 từng bước ngừng sản xuất, nhập khẩu ô tô, xe máy dùng nhiên liệu hóa thạch và đến 2050 về cơ bản 100% phương tiện đường bộ dùng điện, năng lượng xanh. Ô tô điện và hạ tầng sạc là hai mắt xích có quan hệ nhân quả: hạ tầng sạc quyết định tốc độ phổ cập xe điện và ngược lại. Thị trường tăng trưởng nhanh, kéo theo mạng lưới trụ, trạm sạc phủ rộng khắp các tỉnh, thành với công suất đến 360 kW, đồng thời đặt ra các vấn đề an toàn cháy nổ, tương thích đa thương hiệu, minh bạch thanh toán và tác động phụ tải lên lưới phân phối. Hệ thống văn bản hoàn thiện theo hai lớp: tiêu chuẩn tự nguyện chuyển hóa từ IEC (bộ TCVN 13078:2020) và quy chuẩn bắt buộc (QCVN 32:2026/BCT); hạ tầng trạm sạc là công trình liên ngành của quy chuẩn công thương, xây dựng và giao thông.

Ở phạm vi quốc tế, trụ sạc, trạm sạc được điều chỉnh bởi hệ chuẩn IEC/ISO: bộ IEC 61851 về sạc có dây (yêu cầu chung, Mode 1-4, Case A-C, đến 1.000 V AC/1.500 V DC, an toàn trạm DC, truyền thông, tương thích điện từ); đầu nối IEC 62196 với Type 2 và CCS, CHAdeMO, Trung Quốc có hệ GB/T riêng; giao tiếp xe - trụ theo ISO 15118 với Plug&Charge và sạc hai chiều. Việt Nam đã công bố 23 TCVN liên quan trụ, trạm sạc, nhóm nền tảng là bộ TCVN 13078:2020 chuyển hóa trực tiếp IEC 61851; riêng mô hình hoán đổi pin chưa được bao phủ. Quy chuẩn bắt buộc hoàn tất từ dự thảo 3/2025 đến Thông tư 61/2026/TT-BCT ngày 05/10/2026 ban hành QCVN 32:2026/BCT, hiệu lực 01/7/2027: áp dụng cho trạm sạc công cộng, nơi trông giữ xe tập trung, trạm dừng nghỉ; loại trừ trạm trong công trình bao che; cơ sở lắp trước hiệu lực có 24 tháng chuẩn hóa an toàn; yêu cầu dùng chung cho xe có cổng tương thích, thiết kế đồng bộ toàn hệ thống và tự ngắt điện khi có sự cố.

3 nhóm tiêu chuẩn trên cần được xem xét đồng thời khi chọn thiết bị cho trạm sạc đa thương hiệu. Đầu nối phù hợp mới bảo đảm xe có thể kết nối với trụ. Xe và trụ còn phải trao đổi được dữ liệu để thiết lập và điều khiển phiên sạc. ISO 15118 đề cập đến truyền thông qua đường điện (PLC), tự động xác thực khi cắm sạc (Plug&Charge), sạc thông minh và trao đổi điện hai chiều giữa xe với lưới (V2G).

Trong 23 TCVN đã công bố, có 8 tiêu chuẩn về hệ thống trụ, trạm sạc, 3 về dây cáp sạc, 7 về cụm đóng cắt, ổ cắm và phích cắm, 5 về thiết bị đo điện. TCVN 13078-1:2020 quy định yêu cầu chung đối với hệ thống sạc có dây. Trong cùng bộ tiêu chuẩn, phần 21-1 và 21-2 đề cập đến tương thích điện từ của bộ sạc trên xe và ngoài xe, phần 23 về an toàn trạm sạc DC và phần 24 về truyền thông giữa trạm sạc DC với xe.

Về thông số kỹ thuật chi phối thiết kế: dải điện áp đến 1.000 V AC hoặc 1.500 V DC; sạc AC (Mode 3) có dải công suất điển hình 3,7 - 43 kW, sạc DC (Mode 4) từ 60 - 360 kW; đầu nối chủ đạo Type 2 và CCS2, một bộ phận xe nhập khẩu mang GB/T, CHAdeMO. Ở cấp trạm, phụ tải có thể rất lớn: một phương án dùng hai máy biến áp 1.600 kVA có tổng công suất biểu kiến đặt là 3.200 kVA. Khi tính công suất đấu nối, cần xét số xe có thể sạc đồng thời và cách phân bổ công suất giữa các cổng. An toàn điện là lõi: chống giật bằng RCD loại B, bảo vệ quá tải, ngắn mạch, giám sát cách điện, nối đất - chống sét đồng bộ công trình; thiết bị phải đạt tương thích điện từ và cấp bảo vệ IP, IK phù hợp khí hậu nhiệt đới nóng ẩm, ngập úng; đo đếm đúng cấp chính xác, dữ liệu giao dịch toàn vẹn, truy xuất được.

Khi chọn vị trí lắp đặt, cấp IP của vỏ thiết bị cần phù hợp với mức tiếp xúc với bụi và nước, còn cấp IK thể hiện khả năng chịu tác động cơ học của vỏ. Các tình huống sự cố cần tính đến trong thiết kế bảo vệ và ngắt điện gồm cháy, chạm đất, va chạm, ngập nước, quá nhiệt và hư hỏng cách điện.

Về thực tiễn, cả nước đã có hàng trăm nghìn cổng sạc công cộng cùng cụm trạm quy mô lớn và siêu trạm trên cao tốc; liên minh trạm sạc đa thương hiệu sau hai tháng ra mắt

(*) *Bộ môn Kỹ thuật điện, Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải*

đã vận hành hàng trăm trụ dùng chung một ứng dụng và hoàn tiền số dư không dùng. Hà Nội định hình mô hình cụm trạm trung tâm quy mô lớn: cụm gần 29.000 m^2 tại Long Biên, với hơn 800 cổng đang vận hành, dự kiến trên 1.000, từ AC 22 kW đến DC 120 kW, kèm tủ hoán đổi pin. TP.HCM bức xúc nhất với trụ sạc trong nhà chung cư: chưa có quy định an toàn cho nhóm công trình này, chưa có tiêu chuẩn PCCC riêng cho nguy cơ cháy pin lithium-ion trong tầng hầm kín; giải pháp tạm thời là sạc ngoài trời.

Cụm Long Biên cho thấy khả năng phát triển trạm sạc gắn với bãi đỗ xe quy mô lớn. Thời gian đỗ dài tạo điều kiện bố trí các cổng AC, còn các cổng DC phục vụ xe cần nạp điện trong thời gian ngắn hơn. Với hàng trăm cổng trên cùng mặt bằng, phương án mở rộng cần tính đồng thời khả năng cấp điện, đường xe ra vào, chỗ chờ và yêu cầu phòng cháy, chữa cháy.

Trong thiết kế, một hồ sơ hạ tầng trạm sạc phải áp dụng đồng bộ quy chuẩn thiết bị của Bộ Công Thương và quy chuẩn xây dựng, hạ tầng giao thông của Bộ Xây dựng: mặt bằng - tổ chức giao thông (QCVN 07:2023/BXD, QCVN 41:2024/BGTVT) với làn ra vào, bãi chờ, tách luồng sạc nhanh - chậm; nền móng theo TCVN 9362:2012, TCVN 10304 có xét tải trọng gió và nguy cơ va chạm tại vị trí đặt thiết bị; thoát nước - chống ngập với cao độ, độ dốc, bệ nâng, phát hiện ngập - ngắt điện; trang bị điện, chống sét và tuân thủ các quy định về phòng cháy chữa cháy hiện hành (QCVN 12:2014/BXD, TCVN 7447, TCVN 9385-9388, QCVN 06:2022/BXD); trạm dừng nghỉ cập nhật phụ tải quy mô MVA vào quy hoạch điện và giữ khoảng cách an toàn giữa trạm xăng và trạm sạc.

Cao độ nền, độ dốc thoát nước và chiều cao bệ đặt trụ cần được xác định cùng với phương án phát hiện ngập và ngắt điện. Với trạm có cả sạc nhanh và sạc chậm, vị trí bãi chờ và cách tách luồng cần được thể hiện ngay trên bản vẽ mặt bằng để xe chờ sạc không cản trở lối ra vào.

NHỮNG YÊU CẦU KỸ THUẬT CÒN THIẾU HƯỚNG DẪN

3 vướng mắc thường gặp nhất nằm ở khâu lập, thẩm định và nghiệm thu hồ sơ. Thứ nhất, ranh giới thiết bị công nghệ - công trình xây dựng của trụ sạc chưa rõ, dẫn đến lúng túng về cấp phép xây dựng và thẩm định an toàn phần công trình; TP.HCM đã kiến nghị nghiên cứu miễn giấy phép xây dựng đối với công trình trạm sạc. Thứ hai, trụ sạc trong công trình bao che bị loại khỏi phạm vi QCVN 32 trong khi QCVN 04:2021/BXD và QCVN 06:2022/BXD chưa có yêu cầu riêng cho không gian sạc. Thứ ba, yêu cầu thiết kế đồng bộ quy về nhiều quy chuẩn của các bộ ngành (Công Thương, Xây dựng) cùng lúc, chưa có tài liệu hướng dẫn kỹ thuật tổng hợp.

Khoảng trống đầu tiên nằm ở các yêu cầu kỹ thuật khi bố trí trụ sạc xe điện trong tầng hầm kín của chung cư. Khu vực này nằm ngoài phạm vi áp dụng của QCVN 32:2026/BCT, trong khi nhu cầu sạc xe tại nơi ở đặt ra bài toán an toàn cháy cho cả đơn vị thiết kế và cơ quan thẩm định. Theo Sở Xây dựng TP.HCM, các yêu cầu về thông gió, thoát khói, khoảng cách an toàn với xe chạy xăng, dầu và tiếp địa riêng cho khu vực sạc vẫn chưa được quy định cụ thể. Quy định về chỗ để xe cũng chưa xác định vị trí và số lượng trụ sạc cần bố trí.

Khoảng trống thứ hai: Bộ TCVN 13078 chuyển hóa IEC 61851 phiên bản 2017/2018, do đó cần soát xét từng phần của bộ TCVN 13078 theo các phiên bản IEC tương ứng. Khoảng trống thứ ba: đầu nối (IEC 62196) và giao tiếp xe - trụ (ISO 15118) chưa được chuyển hóa thành TCVN, trong khi nguồn cung xe ngày càng đa dạng chuẩn kết nối (CCS2, GB/T, CHAdeMO, NACS), buộc hạ tầng phải tự giải bài toán tương thích.

Khoảng trống thứ tư: Đo lường, thanh toán mới dừng ở nguyên tắc minh bạch; chưa có khung chuẩn về liên thông, chuyển vùng giữa các nhà cung cấp, trong khi thực tiễn mỗi nhà cung cấp một ứng dụng, một ví trả trước vẫn phổ biến. Khoảng trống thứ năm: quản lý phụ tải và quy hoạch mạng lưới sạc (sạc thông minh, sạc hai chiều V2G) chưa có tài liệu chuẩn quốc gia, dù các cụm trạm đã đạt quy mô phụ tải hàng MVA.

Ở khâu thanh toán, các trường dữ liệu cần liên thông gồm điện năng từng phiên sạc, đơn giá và tổng số tiền. Đây cũng là căn cứ để khách hàng đối chiếu khi có sai lệch. Với quản lý phụ tải, có thể thí điểm điều chỉnh công suất theo thời gian xe đỗ và mức tải của trạm, trước hết ở các bãi đỗ có thời gian lưu xe dài.

Ngoài các khoảng trống chuẩn mực, nhiều nội dung đã có yêu cầu nguyên tắc nhưng chưa có hướng dẫn định lượng: chỉ tiêu số làn, bãi chờ, mật độ cổng sạc cho mặt bằng; ngưỡng ngập cho phép theo cao độ và tần suất ngập thiết kế; quy trình đánh giá vận hành lại sau ngập và cắt điện an toàn khi ngập; kiểm toán ảnh hưởng kết cấu khi lắp trụ vào công trình hiện hữu (bãi đỗ tầng, tầng hầm); yêu cầu riêng cho không gian sạc trong công trình bao che.

Các khuyến nghị: Ưu tiên xây dựng quy chuẩn, tiêu chuẩn riêng về an toàn trụ sạc trong công trình xây dựng (PCCC, thông gió - thoát khói, khoảng cách, tiếp địa, giám sát), tiếp thu kiến nghị của TP.HCM; cập nhật TCVN 13078 theo phiên bản IEC hiện hành, chuyển hóa sớm IEC 62196, ISO 15118; chuẩn hóa giao diện đo lường - thanh toán, khuyến khích liên thông đa thương hiệu; lồng ghép hạ tầng sạc vào quy hoạch đô thị và quy hoạch điện (Quy hoạch điện VIII), thí điểm sạc thông minh, V2G; phát triển năng lực thử nghiệm, chứng nhận hợp quy, hậu kiểm thiết bị không rõ nguồn gốc.

Cùng với việc thử nghiệm, chứng nhận và hậu kiểm thiết bị, cần có hướng dẫn kỹ thuật tổng hợp để người lập hồ sơ và cơ quan thẩm định có căn cứ chung về tổ chức giao thông, thoát nước, an toàn điện và phòng cháy, chữa cháy. Phần hướng dẫn nghiệm thu cần làm rõ trách nhiệm kiểm tra đối với thiết bị sạc và phần công trình.

Hạ tầng trạm sạc xe điện là sản phẩm liên ngành, trong đó QCVN 32:2026/BCT giữ vai trò trung tâm kết nối các quy chuẩn xây dựng và hạ tầng giao thông trong thiết kế. Các nội dung cần hướng dẫn thống nhất sớm nhất: trụ sạc trong công trình bao che, chỉ tiêu mặt bằng - tổ chức giao thông, ngưỡng chống ngập, thủ tục thẩm định, nghiệm thu phần công trình. Song song, cần rà soát, cập nhật và hoàn thiện các nhóm nội dung nêu tại mục 2, để hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn luôn đi trước một bước so với tốc độ triển khai của thị trường, phục vụ an toàn, bền vững cho lộ trình điện hóa giao thông đường bộ đến năm 2050.

Trụ sạc đã được thử nghiệm, **vì sao vẫn cần kiểm tra sau lắp đặt?**



TRẦN DUY TÀI*

Việt Nam có 41 tiêu chuẩn quốc gia về sạc xe điện. Hai việc cần làm trước là cập nhật tiêu chuẩn sạc một chiều và hướng dẫn kiểm tra trạm sau lắp đặt.

Một mẫu trụ sạc có thể đã qua thử nghiệm an toàn điện. Khi lắp vào trạm, trụ được nối với đường cấp điện và tủ điện của công trình. Lúc này, chủ đầu tư cần kiểm tra lại hệ thống ngay tại chỗ. Kết quả thử mẫu cho biết thiết bị đáp ứng những yêu cầu nào. Kết quả kiểm tra tại trạm cho biết thiết bị được lắp đặt và đấu nối ra sao.

HAI TIÊU CHUẨN SẠC MỘT CHIỀU CẦN CẬP NHẬT TRƯỚC

Trong 41 tiêu chuẩn quốc gia (TCVN) liên quan đến sạc xe điện, 25 tiêu chuẩn được công bố năm 2025, phần lớn thuộc các bộ mới. Các TCVN này tương đương với tiêu chuẩn quốc tế thuộc các bộ như IEC 61851 về sạc có dây, IEC 62196 về đầu nối, IEC 62893 về cáp, IEC 61980 về sạc không dây và ISO 15118 về giao tiếp giữa xe và hệ thống sạc.

Giao tiếp giữa xe và hệ thống sạc có 8 tiêu chuẩn thuộc bộ TCVN 14333. Sạc có dây và đầu nối mỗi nhóm có 6 tiêu chuẩn. Cáp sạc và đo đếm điện năng mỗi nhóm có 5. Ổ cắm công nghiệp và sạc không dây mỗi nhóm có 3. Năm tiêu chuẩn còn lại đề cập đến lắp đặt, tủ điện, thiết bị bảo vệ trên cáp, an toàn phía xe và lưu trữ điện. (Bảng 1)

Với sạc một chiều (DC), TCVN 13078-23:2020 quy định yêu cầu đối với thiết bị sạc. TCVN 13078-24:2022 quy định cách thiết bị và xe trao đổi dữ liệu để điều khiển quá trình sạc. Cả hai TCVN trên được xây dựng hoàn toàn tương đương bản IEC năm 2014. IEC đã ban hành bản năm 2023 cho cả hai phần, vì vậy trong thời gian tới cần nghiên cứu, cập nhật theo tiêu chuẩn IEC mới nhất. (Bảng 2)

Có 19 tài liệu tiêu chuẩn quốc tế cần xem xét. Một số đã có phiên bản mới, một số chưa có TCVN tương ứng. Sau hai tiêu chuẩn sạc DC, cần xem xét các phần mới của ISO 15118 và tiêu chuẩn dùng để thử giao tiếp. Các nhóm sạc công suất rất lớn, sạc tự động và sạc không dây công suất cao nên được đưa vào kế hoạch theo nhu cầu lắp đặt. Với IEC 62955, IEC 63119, IEC 62909-1 và OCPP (IEC 63584), cần kiểm tra tình trạng ban hành và phạm vi áp dụng trước khi đề xuất chuyển đổi.

ĐẦU NỐI VỪA VỚI XE, VẪN CẦN THỬ GIAO TIẾP

Khi chọn trụ cho một trạm phục vụ nhiều dòng xe, chủ đầu tư cần xem hai việc. Đầu nối có phù hợp với ổ cắm trên xe hay không? Sau khi cắm, xe và trụ có trao đổi được dữ liệu để bắt đầu và điều khiển quá trình sạc hay không? Chương trình NEVI của Hoa Kỳ tham chiếu ISO 15118. Trung Quốc dùng GB/T 27930:2023 cho giao tiếp CAN giữa bộ sạc ngoài xe và xe. Vì vậy, hồ sơ lựa chọn thiết bị cần ghi rõ chuẩn đầu nối và chuẩn giao tiếp mà trụ hỗ trợ. (Bảng 3)

KIỂM TRA NHỮNG GÌ TRƯỚC VÀ SAU KHI TRẠM MỞ CỬA?

Đầu tiên là thử mẫu trụ sạc. Phòng thử nghiệm có năng lực theo ISO/IEC 17025 kiểm tra an toàn điện, khả năng làm việc trong môi trường có nhiễu điện từ, cáp, đầu nối và thiết bị đo. Căn cứ thử gồm TCVN 13078, TCVN 12671-2 và TCVN 14296.

Tiếp đó là thử riêng phần giao tiếp. Các phần 4, 5 và 9 của TCVN 14333 là căn cứ để thử cách xe và trụ truyền dữ liệu, từ đường truyền đến cách hai bên trao đổi thông tin trong lúc sạc.

Kết quả thử mẫu là căn cứ để tổ chức có năng lực theo ISO/IEC 17065 xem xét chứng nhận sản phẩm. Việc đánh giá mẫu và giám sát sau chứng nhận có thể thực hiện theo ISO/IEC 17067.

Sau khi lắp trụ, cần kiểm tra hệ thống cấp điện tại trạm trước khi đưa vào sử dụng và kiểm tra định kỳ trong quá trình

(*) Chuyên viên chính Ban Tiêu chuẩn, Ủy ban Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Quốc gia (Bộ KH&CN)

Bảng 1. Tiêu chuẩn cho từng bộ phận của hệ thống sạc

Hạng mục	TCVN	Tiêu chuẩn quốc tế tương ứng
Lắp đặt và tủ điện	TCVN 7447-7-722 về cấp điện hạ áp cho xe điện. TCVN 13724-7 về cụm đóng cắt và điều khiển hạ áp	IEC 60364-7-722 và IEC 61439-7
Đo đếm điện năng	TCVN 11345-41, TCVN 14472, TCVN 7589-52	IEC 62052-41, IEC 62058, IEC 62053-52
Trụ sạc xoay chiều (AC) và một chiều (DC)	TCVN 13078-1 về yêu cầu chung, TCVN 13078-23 và -25 về thiết bị sạc DC, TCVN 13078-21-2 về tương thích điện từ, TCVN 13510 về thiết bị điều khiển và bảo vệ tích hợp trên cáp (IC-CPD)	IEC 61851-1, -23, -25, -21-2 và IEC 62752
Cáp và đầu nối	TCVN 12671 về cáp sạc, TCVN 14296 về đầu nối xe, TCVN 13590 về ổ cắm công nghiệp	IEC 62893, IEC 62196 và IEC 60309
Phía xe	TCVN 12772 về an toàn khi nối nguồn. TCVN 13078-21-1 về tương thích điện từ của bộ sạc trên xe	ISO 17409 và IEC 61851-21-1
Giao tiếp xe - trụ sạc	TCVN 14333 và TCVN 13078-24	ISO 15118 (các phần liên quan trong phạm vi từ Phần 1 đến Phần 20) và IEC 61851-24
Lưu trữ điện, điện mặt trời và sạc không dây	TCVN 14499-2-200 cho phần lưu trữ điện, điện mặt trời. TCVN 14450 cho sạc không dây	IEC TR 62933-2-200 và IEC 61980

Bảng 2. Các nhóm tiêu chuẩn cần rà soát

Nhóm	Căn cứ đang dùng và tài liệu cần rà soát
Thiết bị sạc DC và giao tiếp điều khiển sạc	TCVN 13078-23:2020 và TCVN 13078-24:2022 dựa trên IEC 61851-23:2014 và IEC 61851-24:2014. Cần cập nhật theo IEC 61851-23:2023 và IEC 61851-24:2023.
Giao tiếp xe - trụ	TCVN 14333-2 và -3 dựa trên ISO 15118-2:2014 và ISO 15118-3:2015. Các tài liệu mới cần rà soát gồm ISO 15118-10:2025, ISO 15118-21:2025 và ISO/PAS 15118-23:2026.
Các phần bổ sung của bộ IEC 61851	TCVN 13078-25:2023 dựa trên IEC 61851-25:2020. Các phần IEC TS 61851-3-1 đến 3-7:2023 chưa có TCVN tương ứng.
Sạc công suất rất lớn và các cấu hình mới	Cần nghiên cứu chuyển đổi IEC 61851-23-1, IEC 61851-23-3 (MCS), IEC 61851-26 và IEC 61851-27.
Sạc không dây	TCVN 14450-1, -2, -3 tương ứng với IEC 61980-1, -2, -3. Cần nghiên cứu các tài liệu IEC PAS 61980-4, -5, -6 giai đoạn 2024–2025.

Bảng 3. Đối chiếu tiêu chuẩn và cách đánh giá tại Việt Nam, Hoa Kỳ và Trung Quốc

Hạng mục	Việt Nam	ISO, IEC và cơ chế quốc tế	Hoa Kỳ	Trung Quốc
An toàn, lắp đặt	TCVN 13078-1, -23, -25 và TCVN 7447-7-722	IEC 61851-1, -23, -25 và IEC 60364-7-722	UL 2594 (AC), UL 2202 (DC), NFPA 70 Điều 625	GB/T 18487.1:2023 và NB/T 33001
Đầu nối	TCVN 14296 và TCVN 13590	IEC 62196-1, -2, -3 và IEC 60309	SAE J1772, SAE J3400 và UL 2251	GB/T 20234.1 đến .4, trong đó .4 là đầu nối DC công suất lớn
Giao tiếp xe - trụ	TCVN 14333 và TCVN 13078-24	ISO 15118 và IEC 61851-24	ISO 15118 theo NEVI	GB/T 27930:2023 (CAN)
Thử nghiệm, chứng nhận	TCVN 14333-4, -5, -9 và TCVN ISO/IEC 17065	ISO 15118-4, -5, -9 và cơ chế IECEE CB	ISO 15118-4, -5 và hệ thống phòng thử nghiệm NRTL	GB/T 34657.1, .2 về tương thích và GB/T 34658 về thử giao thức
Đo đếm điện năng	TCVN 14472 và TCVN 11345-41	IEC 62058 và IEC 62052-41	NIST Handbook 44, mục 3.40	GB/T 28569 (AC) và GB/T 29318 (DC)
Sạc không dây	TCVN 14450	IEC 61980	SAE J2954 và UL 2750	GB/T 38775

khai thác. Có thể xây dựng hướng dẫn từ TCVN 7447-7-722 và IEC 60364-6. Đơn vị giám định cần có năng lực theo ISO/IEC 17020.

Để áp dụng năm bước trên, cần xây dựng chương trình đánh giá sự phù hợp cho trạm sạc. Việc đầu tiên là xác định trong nước đã có nơi nào thử được trụ DC công suất cao, thử tương thích điện từ và thử giao tiếp theo ISO 15118. Cũng cần rà soát năng lực của các tổ chức chứng nhận, giám định. Việc công nhận năng lực dựa trên ISO/IEC 17011. Có thể xem xét thừa nhận kết quả qua Tổ chức Hợp tác Công nhận Toàn cầu (Global ACI) (Tổ chức hợp nhất của ILAC và IAF), APAC.

Về lâu dài, cần rà soát danh mục TCVN theo chu kỳ cập nhật của IEC và ISO, tăng cường tham gia TCVN/TC 22, ISO/TC 22 về phương tiện giao thông đường bộ và IEC TC 69 về hệ thống truyền điện, năng lượng cho phương tiện điện. Với phần lắp đặt điện, cần theo dõi công việc của IEC TC 64.

Hai hướng dẫn cần làm sớm là kiểm tra lắp đặt tại trạm theo TCVN 7447-7-722 và kiểm định công tơ sạc có tham chiếu TCVN 14472. Hướng dẫn cần chỉ rõ ai kiểm tra, kiểm tra ở thời điểm nào và kết quả nào phải có khi nghiệm thu.

Các chủ đầu tư, tổ chức, doanh nghiệp tham gia đầu tư, xây dựng, lắp đặt, quản lý và vận hành trụ sạc, trạm sạc xe điện cần chủ động nghiên cứu, cập nhật và thực hiện đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật quy định tại QCVN 32:2026/BCT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về trụ sạc, trạm sạc xe điện, ban hành kèm theo Thông tư số 61/2026/TT-BCT ngày 29/9/2026 của Bộ trưởng Bộ Công Thương, đồng thời nghiên cứu, áp dụng các tiêu chuẩn quốc gia (TCVN) hiện hành có liên quan.

Trong quá trình triển khai, cần đặc biệt chú trọng các yêu cầu về an toàn điện, phòng chống cháy, nổ, bảo vệ người sử dụng, khả năng tương thích kỹ thuật giữa thiết bị sạc và phương tiện, cũng như các yêu cầu về lắp đặt, kết nối, kiểm tra, bảo trì và vận hành hệ thống trạm sạc. Việc lựa chọn công nghệ, thiết bị và giải pháp kỹ thuật cần bảo đảm phù hợp với điều kiện hạ tầng điện, nhu cầu sử dụng thực tế, khả năng kết nối và mở rộng hệ thống trong tương lai.

Đo đúng điện năng để tính đúng tiền sạc xe điện



TRẦN ĐỨC TÙNG*

Khi số liệu điện năng trên trụ sạc và trên ứng dụng chênh lệch, đơn vị vận hành nên đối chiếu kết quả đo với dữ liệu dùng để thanh toán của cùng một phiên sạc để xác định nguyên nhân.

CÓ THẮC MẮC VỀ TIỀN SẠC, TRA LẠI DỮ LIỆU CỦA PHIÊN SẠC

Đơn vị vận hành nên thông tin rõ cách tính giá và các khoản phí, nếu có, trước khi khách hàng sử dụng dịch vụ. Sau phiên sạc, thông tin thanh toán nên thể hiện lượng điện năng ghi nhận (kWh), thời gian sạc, mức giá hoặc cách tính giá đã áp dụng và tổng số tiền phải trả. Nếu tính phí theo thời gian, nên thể hiện rõ khoảng thời gian dùng để tính phí và bảo đảm số liệu cung cấp cho khách hàng nhất quán với dữ liệu thanh toán.

Khi có phản ánh, đơn vị vận hành nên tìm đúng phiên sạc theo mã giao dịch hoặc thời điểm sạc, rồi đối chiếu kết quả đo với dữ liệu lưu và thông tin thanh toán. Nếu số liệu hiển thị chênh lệch, cần kiểm tra các khâu ghi nhận, truyền và hiển thị dữ liệu. Nếu dữ liệu về lượng điện năng đã khớp mà số tiền vẫn chênh lệch so với cách tính đã công bố, cần kiểm tra đơn giá, phương pháp tính và từng khoản phí.

Tại trạm sạc, số liệu đo đếm tại điểm giao nhận phục vụ giao dịch điện năng giữa bên bán điện và bên mua điện. Số liệu đo theo từng phiên sạc cho biết lượng điện năng ghi nhận của phiên đó và là căn cứ tính tiền nếu giá dịch vụ tính theo điện năng.

Đơn vị vận hành nên bảo vệ dữ liệu đo trong quá trình lưu trữ, truyền và hiển thị, đồng thời duy trì khả năng tra cứu. Khi cập nhật phần mềm có liên quan đến chức năng đo hoặc xử lý dữ liệu đo, nên lưu thông tin về phiên bản, thời điểm và nội dung thay đổi để đối chiếu khi phát sinh sai lệch. Khi nghiên cứu về phần mềm và bảo vệ dữ liệu đo, có thể tham khảo OIML D 31:2023 của Tổ chức Đo lường pháp định quốc tế và WELMEC Guide 7.2:2025 của Tổ chức Hợp tác châu Âu về đo lường pháp định. Đây là các tài liệu tham khảo kỹ thuật.

YÊU CẦU ĐO LƯỜNG ĐỐI VỚI THIẾT BỊ ĐO ĐIỆN NĂNG SẠC PIN XE ĐIỆN

Đối với hệ thống đo đếm điện năng tại điểm giao nhận, cần đối chiếu Luật Điện lực số 61/2024/QH15 và Thông tư số 05/2025/TT-BCT về hệ thống truyền tải điện, phân phối điện và đo đếm điện năng, đã được sửa đổi, bổ sung bởi Thông tư số 46/2025/TT-BCT. Vị trí đo và yêu cầu đối với hệ thống đo đếm được xác định theo từng trường hợp giao nhận.

Điều 19 Luật Đo lường số 04/2011/QH13 quy định các biện pháp kiểm soát về đo lường đối với phương tiện đo nhóm 2. Thiết bị đo điện năng sạc pin xe điện được liệt kê tại số thứ tự 69 trong danh mục tại khoản 1 Điều 4 Thông tư số 23/2013/TT-BKHCN. Khoản này đã được sửa đổi, bổ sung tại khoản 2 Điều 1 Thông tư số 07/2019/TT-BKHCN, Điều 1 Thông tư số 03/2024/TT-BKHCN và Điều 4 Thông tư số 04/2026/TT-BKHCN. Thông tư số 04/2026/TT-BKHCN có hiệu lực từ ngày 15/4/2026.

Cả ba loại thiết bị trong bảng đều thuộc diện phê duyệt mẫu khi sản xuất, nhập khẩu và kiểm định ban đầu trước khi đưa vào sử dụng. Trong quá trình sử dụng, thiết bị phải được kiểm định định kỳ và kiểm định sau sửa chữa theo chu kỳ tương ứng.

Khi lựa chọn thiết bị, đơn vị vận hành cần đối chiếu thông tin thiết bị với quyết định phê duyệt mẫu tương ứng và kiểm tra hiệu lực của chứng chỉ kiểm định trước khi đưa vào sử dụng. Đơn vị sử dụng phải duy trì đặc tính kỹ thuật đo

(*) Chuyên viên Ban Đo lường, Ủy ban Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng Quốc gia (Bộ KH&CN)



TT	Tên phương tiện đo	Biện pháp kiểm soát về đo lường				Chu kỳ kiểm định
		Phê duyệt mẫu	Kiểm định			
			Ban đầu	Định kỳ	Sau sửa chữa	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
69	Thiết bị đo điện năng sạc pin xe điện:					
	- Thiết bị đo điện năng xoay chiều sạc pin xe đạp điện, xe máy điện	x	x	x	x	60 tháng
	- Thiết bị đo điện năng xoay chiều sạc pin xe ô tô điện	x	x	x	x	36 tháng
	- Thiết bị đo điện năng một chiều sạc pin xe ô tô điện	x	x	x	x	36 tháng

Dấu "x" chỉ biện pháp phải thực hiện. Nguồn: Số thứ tự 69 trong bảng tại Điều 4 Thông tư số 04/2026/TT-BKHCN.

lường của thiết bị trong suốt quá trình sử dụng. Khi phát hiện phương tiện đo sai, hỏng, phải dừng sử dụng phương tiện đó và thực hiện biện pháp khắc phục theo điểm b khoản 2 Điều 38 Luật Đo lường.

HOÀN THIỆN QUY TRÌNH VÀ NĂNG LỰC ĐO KIỂM TẠI TRẠM

Doanh nghiệp nên rà soát hồ sơ thiết bị đang sử dụng, theo dõi thời hạn kiểm định và bố trí đầu mối tra cứu dữ liệu phiên sạc. Khi gặp vướng mắc trong áp dụng, doanh nghiệp nên gửi cơ quan có thẩm quyền thông tin về loại thiết bị, chức năng đo, mục đích sử dụng kết quả đo và hồ sơ kỹ thuật liên quan để được hướng dẫn. Việc phối hợp giữa các bên cần thực hiện theo chức năng, thẩm quyền.

Để hỗ trợ triển khai, cần tiếp tục xây dựng, hoàn thiện các văn bản kỹ thuật đo lường Việt Nam (ĐLVN) về yêu cầu kỹ thuật đo lường, quy trình thử nghiệm mẫu và quy trình kiểm định thiết bị đo điện năng sạc pin xe điện. Với thiết bị đo điện năng một chiều (DC), có thể xem xét phát triển chuẩn đo công suất và điện năng, phương tiện đo kiểm tại hiện trường và năng lực đánh giá phần mềm liên quan đến chức năng đo.

Về thiết kế, nhà sản xuất có thể xem xét kết hợp bảo vệ phần cứng với kiểm soát quyền truy cập và lưu vết các can thiệp có thể ảnh hưởng đến kết quả đo. Nếu tách chức năng đo khỏi chức năng truyền và hiển thị dữ liệu, cần kiểm soát việc trao đổi dữ liệu giữa các phần để việc nâng cấp kết nối hoặc thay đổi giao diện không làm sai lệch kết quả đo.

Khi khách hàng thắc mắc, đơn vị vận hành nên dựa vào dữ liệu của chính phiên sạc để giải thích căn cứ tính tiền và từng khoản phí, nếu có.

Dùng điện mặt trời cho trạm sạc xe điện



PGS.TS LÊ VĂN NGHĨA*

Trạm sạc có thể dùng điện mặt trời để sạc xe ban ngày, tích phần điện dư vào pin và dùng lại khi ít nắng hoặc nhiều xe cùng sạc.

Chuyển đổi xanh trong giao thông đường bộ là xu hướng tất yếu nhằm giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch, hạn chế phát thải khí nhà kính và ô nhiễm môi trường. Quá trình này được thúc đẩy thông qua việc điện hóa phương tiện, từ xe sử dụng động cơ đốt trong (ICEV), xe hybrid (HEV), hybrid sạc ngoài (PHEV) đến xe điện thuần pin (BEV) và xe điện mở rộng phạm vi hoạt động (EREV). Bên cạnh phát triển công nghệ phương tiện, việc xây dựng hạ tầng sạc thông minh, tích hợp năng lượng tái tạo và hệ thống lưu trữ năng lượng đóng vai trò quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, giảm phát thải trong toàn bộ vòng đời phương tiện và hướng tới hệ thống giao thông bền vững.

Một chiếc xe điện lăn bánh trên đường không thải khói từ ống xả. Nhưng trước mỗi chuyến đi, xe vẫn cần được nạp điện. Điện ấy đến từ đâu, được sử dụng vào lúc nào và liệu lưới điện có đáp ứng khi nhiều xe cùng sạc? Đó là những câu hỏi cần đặt ra khi phát triển giao thông xanh, bên cạnh việc thay thế động cơ xăng, dầu bằng động cơ điện.

Bài viết nhấn mạnh mối liên hệ giữa phương tiện, hạ tầng sạc và nguồn điện sạch. Theo cách tiếp cận này, trạm sạc có thể làm nhiều hơn việc cấp điện cho xe: tạo điện tại chỗ, giữ lại phần chưa dùng hết và phân bổ nguồn cung theo nhu cầu.

MUỐN XE XANH HƠN, CẦN NHÌN VÀO NGUỒN ĐIỆN

Không có khí thải tại ống xả là lợi thế rõ ràng của xe điện chạy pin, nhất là đối với không khí tại nơi xe hoạt động. Tuy nhiên, để đánh giá tác động môi trường trong suốt vòng đời, còn phải tính đến quá trình sản xuất xe, chế tạo pin và cung cấp điện. Vì thế, nguồn điện dùng để sạc là một phần quan trọng của bài toán giảm phát thải.

Ở phía trạm sạc, khó khăn dễ thấy là nhu cầu công suất. Khi nhiều xe cùng dùng bộ sạc nhanh, lượng điện cần cấp tại một điểm có thể tăng mạnh. Chủ đầu tư phải tính xem hệ thống hiện có chịu được đến đâu, có cần nâng cấp hay không và vận hành thế nào để tránh dồn nhu cầu vào cùng một thời điểm.

Điện mặt trời lại có nhịp phát riêng. Nguồn điện này dồi dào hơn vào ban ngày, còn xe có thể trở về bãi vào buổi tối, sau một ca làm việc. Nếu chỉ lắp thêm tấm pin mà không tính đến lịch xe, trạm có thể dư điện lúc ít người sạc nhưng vẫn phải mua điện khi nhu cầu tăng cao.

Kết hợp điện mặt trời, pin lưu trữ và điện lưới là một hướng xử lý sự chênh lệch đó. Điện được tạo ra ngay tại trạm; phần chưa dùng đến có thể giữ lại trong pin; khi nguồn tại chỗ không đủ, lưới điện bổ sung. Hiệu quả phụ thuộc vào việc phối hợp các nguồn này ra sao, chứ không chỉ ở số lượng thiết bị được lắp đặt.

GIỮ ĐIỆN LÚC CÓ NẮNG, DÙNG KHI XE CẦN

Mái che bãi đỗ, mái nhà ở trung tâm thương mại hay nhà xưởng đều là những vị trí có thể xem xét lắp điện mặt trời. Cùng một diện tích, công trình vừa che nắng cho xe, vừa có thể tạo thêm nguồn điện. Tuy nhiên, lượng điện thu được còn tùy nắng, nhiệt độ và bóng che. Khảo sát kỹ địa điểm sẽ giúp tránh đầu tư theo diện tích sẵn có mà bỏ qua khả năng phát điện thực tế.

Pin lưu trữ giúp giữ lại điện mặt trời chưa dùng hết để cấp cho xe vào lúc khác. Khi nhiều xe cùng sạc, pin có thể



Hình 1. Ba cấu hình trạm sạc (PV là hệ thống điện mặt trời, BESS là hệ thống lưu trữ năng lượng bằng pin).

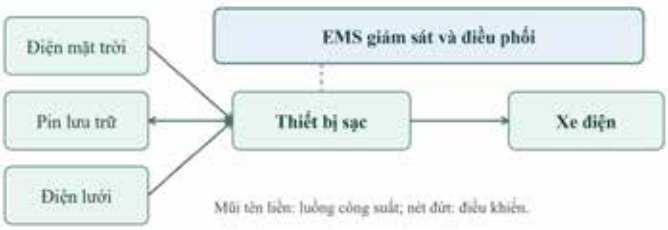
(*) *Đại học Bách khoa Hà Nội*

chia sẻ một phần công suất với lưới điện. Tuy vậy, mức hỗ trợ không kéo dài vô hạn: pin còn bao nhiêu điện, có thể xả ở công suất nào và phải giữ mức dự phòng bao nhiêu đều cần được tính toán.

Mỗi trạm cần một cách bố trí phù hợp. Nếu xe thường đỗ và sạc ban ngày, kết hợp điện mặt trời với lưới điện có thể là phương án tương đối đơn giản. Thêm pin lưu trữ sẽ giúp chủ động hơn về thời điểm sử dụng điện, nhưng cũng cần thêm vốn và chi phí quản lý. Với trạm không kết nối lưới, yêu cầu dự phòng cho những ngày ít nắng càng phải được xem xét cẩn thận.

Khi có cả điện mặt trời, pin và điện lưới, hệ thống vận hành có nhiều lựa chọn hơn để cấp điện cho xe. Dù vậy, không phải cứ lắp pin là trạm sẽ tiếp tục hoạt động khi mất điện. Muốn làm được điều đó, hệ thống cần được thiết kế với khả năng vận hành độc lập và các thiết bị bảo vệ phù hợp ngay từ đầu. Tùy điều kiện từng địa điểm, có thể lựa chọn một trong ba cấu hình trạm sạc ở Hình 1 để nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và giảm phát thải khí nhà kính.

SẠC ĐÚNG LÚC CŨNG QUAN TRỌNG NHƯ SẠC NHANH



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý trạm sạc đa nguồn và vai trò của hệ thống quản lý năng lượng (EMS).

Hình 2 minh họa cách hệ thống quản lý năng lượng (EMS) điều phối các nguồn điện tại trạm sạc. EMS theo dõi công suất phát của hệ thống điện mặt trời, lượng điện còn trong pin và nhu cầu sạc của các xe. Kết hợp với dự báo thời tiết, giá điện và lịch xe, EMS giúp xác định thời điểm nạp pin lưu trữ, thời điểm sử dụng điện lưới và cách phân bổ công suất giữa các cổng sạc.

Chẳng hạn, vào lúc nắng tốt nhưng ít xe, điện mặt trời được ưu tiên cấp cho xe đang sạc, phần dư có thể đưa vào pin. Khi mây che hoặc lượng xe tăng, pin hỗ trợ, còn lưới điện bù phần thiếu. Điện dư chỉ được phát lên lưới khi đáp ứng các điều kiện áp dụng tại điểm đấu nối.

Một chiếc xe đỗ nhiều giờ không nhất thiết phải sạc ở công suất cao nhất ngay khi cắm điện. Nếu biết xe cần rời bãi lúc nào và còn thiếu bao nhiêu điện, hệ thống có thể bố trí thời gian sạc hợp lý hơn. Ngược lại, xe cần đi tiếp sớm sẽ có yêu cầu khác. Sắp xếp tốt những nhu cầu này giúp trạm sử dụng nguồn điện hiệu quả mà vẫn bảo đảm lịch trình của người dùng.

Tài liệu cũng đề cập khả năng ứng dụng dự báo, tối ưu hóa và trí tuệ nhân tạo trong điều phối. Các công cụ ấy chỉ hữu ích khi có dữ liệu đủ tin cậy và giải quyết được nhu cầu cụ thể. Với người sử dụng, điều quan trọng vẫn là xe được nạp đủ điện đúng lúc; với chủ trạm, đó còn là chi phí hợp lý và thiết bị vận hành an toàn.

HIỆU QUẢ PHẢI THỂ HIỆN TRONG VẬN HÀNH

Lắp nhiều tấm pin chưa có nghĩa là xe đã dùng nhiều điện sạch. Cần biết bao nhiêu điện tái tạo thực sự được nạp cho phương tiện, trực tiếp hoặc qua pin lưu trữ. Nếu pin còn nạp bằng điện lưới, phải phân biệt được nguồn điện đầu vào và tính phần tổn hao. Nhờ đó, lợi ích môi trường mới được đánh giá đúng.

Giảm lượng điện mua từ lưới có thể giúp giảm phát thải gián tiếp, nhưng kết quả còn tùy nguồn điện thay thế và cách tính. Khi công bố mức giảm phát thải, cần nói rõ thời gian đánh giá, phạm vi và dữ liệu sử dụng. Nếu xét toàn bộ vòng đời, phải tính thêm tác động từ sản xuất, thay thế tấm pin và bộ lưu trữ.

Chi phí cũng cần được nhìn trong suốt thời gian khai thác. Ngoài tiền lắp đặt, chủ trạm còn phải trả tiền điện, bảo dưỡng và thay pin khi cần. Bộ lưu trữ quá nhỏ có thể hỗ trợ không đủ vào giờ đông xe; quá lớn lại làm tăng vốn đầu tư trong khi ít được sử dụng. Quy mô phù hợp phải dựa trên nhu cầu và điều kiện của từng trạm.

Trước khi đầu tư, mô phỏng có thể giúp so sánh phương án chỉ dùng điện lưới với phương án có điện mặt trời và pin lưu trữ. Việc so sánh phải dựa trên cùng nhu cầu sạc, đồng thời theo dõi thời gian chờ và lượng điện thực sự cấp cho xe. Tiết kiệm điện mà để khách chờ lâu hơn hoặc không đủ điện tiếp tục hành trình thì chưa đạt mục tiêu phục vụ.

BẮT ĐẦU TỪ NHU CẦU CỦA TỪNG ĐIỂM SẠC

Ở Việt Nam, những nơi có thể xem xét mô hình này gồm bãi đỗ đô thị, trung tâm thương mại, tòa nhà, bãi xe buýt, cơ sở logistics, khu công nghiệp và trạm sạc liên tỉnh. Diện tích sẵn có, giờ xe đến và thời gian dừng đỗ ở mỗi nơi khác nhau. Vì thế, phương án đầu tư cũng cần khác nhau.

Tại bãi đỗ thương mại, xe lưu lại lâu có thể thuận lợi cho việc sắp xếp sạc theo lượng điện mặt trời. Với bãi xe buýt hay đội xe tập trung, lịch chạy tương đối ổn định giúp dự tính nhu cầu và phân bổ các phiên sạc. Còn trên tuyến liên tỉnh, trạm phải chú trọng khả năng cấp điện tin cậy cho những xe cần nhanh chóng tiếp tục hành trình.

Bước đầu tiên nên là khảo sát địa điểm, đo nhu cầu và kiểm tra khả năng đấu nối. Từ dữ liệu đó, chủ đầu tư mới lựa chọn công suất điện mặt trời, dung lượng pin, số cổng sạc và cách quản lý. An toàn điện, kiểm soát nhiệt độ, bảo dưỡng và chi phí vận hành cần được tính cùng với phương án kinh doanh.

Về lâu dài, sạc hai chiều có thể cho phép xe cấp điện trở lại cho công trình hoặc lưới điện khi đủ điều kiện. Hướng đi này vẫn cần xem xét tuổi thọ pin và lịch di chuyển của chủ xe. Trước mắt, phối hợp tốt điện mặt trời, pin lưu trữ và nhu cầu sạc là công việc thiết thực. Một trạm sạc được thiết kế sát nhu cầu sẽ giúp xe điện sử dụng năng lượng hiệu quả hơn, đồng thời tạo cơ sở để mở rộng hạ tầng giao thông xanh.❖

Vai trò của kiến trúc trong giữ gìn bản sắc



KTS PHẠM THANH TÙNG

Khi kiến trúc được đặt trong mối quan hệ hữu cơ với văn hóa và con người, thì những công trình mọc lên không chỉ có giá trị sử dụng mà còn có khả năng nuôi dưỡng tinh thần; những không gian được quy hoạch sẽ không chỉ đáp ứng yêu cầu phát triển mà còn tạo điều kiện cho sự gắn kết xã hội; những đô thị và làng quê được cải tạo sẽ không chỉ hiện đại hơn mà còn giữ được ký ức bản sắc và tình cảm cộng đồng…

ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lịch sử dựng nước và giữ nước của dân tộc, đặc biệt là khi dưới sự lãnh đạo của Đảng, văn hóa luôn được xác định là nền tảng tinh thần, sức mạnh nội sinh và nguồn lực quan trọng cho sự phát triển đất nước. Văn hóa không chỉ hiện diện trong ngôn ngữ, phong tục, tín ngưỡng, nghệ thuật hay những giá trị tinh thần được trao truyền qua các thế hệ mà còn kết tinh trong không gian sống, trong hình thái làng xã, cấu trúc đô thị, kiến trúc nhà ở, đình, chùa, đền, miếu, chợ, quảng trường, đường phố, những cảnh quan gắn bó với mỗi làng xã, như cổng làng, cây đa, giếng nước, sân đình, chợ quê; với đô thị là khu phố cổ với mạng lưới đường nhỏ theo kiểu ô bàn cờ… Mỗi vùng miền với cách tổ chức không gian thích ứng khí hậu, cảnh quan thiên nhiên và tập quán sinh hoạt đều chứa đựng những câu chuyện về lịch sử, về cội nguồn, về con người và bản sắc văn hóa Việt Nam. Những không gian ấy không đơn thuần là sản phẩm vật chất. Chúng lưu giữ ký ức, kết nối các thế hệ, hình thành ý thức về quê hương, nuôi dưỡng tình cảm cộng đồng và góp phần tạo nên sự đa dạng, thống nhất của nền văn hóa dân tộc.

Trong bối cảnh đất nước bước vào giai đoạn phát triển mới, với khát vọng xây dựng một Việt Nam hùng cường, thịnh vượng, văn minh, hạnh phúc, vấn đề đặt ra không chỉ là làm thế nào để bảo tồn các di sản văn hóa đã hình thành trong quá khứ, mà còn làm thế nào để kiến tạo các không gian văn hóa mới phù hợp với đời sống đương đại, đáp ứng nhu cầu của nhân dân, tăng cường sự gắn kết giữa các cộng đồng. Đây là vấn đề có ý nghĩa đặc biệt đối với kiến trúc và quy hoạch kiến trúc đô thị - nông thôn.

KIẾN TRÚC - MỘT SỨC MẠNH VĂN HÓA CẦN ĐƯỢC NHẬN DIỆN ĐẦY ĐỦ

Nếu văn hóa là linh hồn của một dân tộc, thì kiến trúc ở một phương diện quan trọng, chính là hình hài vật chất của linh hồn ấy trong không gian sống. Nếu các giá trị văn hóa cần được truyền từ thế hệ này sang thế hệ khác, thì kiến trúc là một trong những phương tiện giúp những giá trị đó hiện diện, được trải nghiệm và tiếp tục phát triển trong đời sống hàng ngày.

Một công trình kiến trúc có thể tồn tại hàng trăm năm. Một quảng trường có thể chứng kiến nhiều thế hệ người dân. Một con phố có thể lưu giữ ký ức của cả một đô thị. Một ngôi đình có thể trở thành điểm tựa tinh thần cho cộng đồng qua nhiều biến động của lịch sử. Và khi các không gian ấy bị phá vỡ, con người không chỉ mất đi một công trình vật chất, mà đôi khi còn mất đi một phần ký ức, một điểm tựa tinh thần và một nơi chốn để nhận diện chính mình. Vì vậy, giữ gìn bản sắc kiến trúc và kiến tạo không gian văn hóa gắn kết cộng đồng không phải là công việc riêng của ngành kiến trúc, càng không phải là câu chuyện về hình thức thẩm mỹ, mà đây là một nhiệm vụ văn hóa, xã hội và phát triển con người liên quan trực tiếp đến chất lượng sống của nhân dân và sức mạnh của khối đại đoàn kết dân tộc.

Với góc nhìn đó, một vấn đề cốt lõi được đặt ra, đó là Kiến trúc Việt Nam cần làm gì để giữ gìn được hồn cốt văn hóa dân tộc, vừa kiến tạo những không gian sống mới, nơi mọi người dân có thể gặp gỡ, giao lưu, chia sẻ, cùng tham gia vào đời sống xã hội và cảm nhận sâu sắc hơn sự gắn bó với cộng đồng, với quê hương, đất nước.

Kiến trúc là nơi văn hóa hiện diện trong đời sống hàng ngày:

Trong nhận thức thông thường, kiến trúc được nhìn nhận như những sản phẩm xây dựng riêng lẻ, những công trình cụ thể, như: nhà ở, trường học, bệnh viện, công sở, nhà hát, công trình tôn giáo, công trình công cộng… Sự nhìn nhận ấy chưa đầy đủ, chưa nhận diện đúng vai trò của kiến trúc đối với văn hóa, với xã hội.



Kinh nghiệm từ những đô thị di sản ở châu Âu, châu Á và đô thị cổ Hội An của Việt Nam cho thấy, giá trị của một khu phố cổ không chỉ nằm trong những công trình được tu bổ, mà còn ở tính liên tục của đời sống đô thị.

Kiến trúc trước hết là nghệ thuật tổ chức không gian phục vụ con người. Nhưng không gian ấy không bao giờ đơn độc, nó ảnh hưởng đến cách con người sống, gặp gỡ, giao tiếp, ứng xử và hình thành quan hệ với nhau, như khi chúng ta kiến tạo nhà ở, đường phố, quảng trường, công viên, trường học hay các thiết chế văn hóa. Một khu dân cư có vỉa hè rộng rãi, nhiều cây xanh, sân chơi và không gian sinh hoạt chung sẽ tạo điều kiện để người dân gặp gỡ, trò chuyện, tổ chức các hoạt động cộng đồng. Một khu đô thị chỉ gồm những tòa nhà cao tầng, bãi đỗ xe và các tuyến đường chủ yếu dành cho phương tiện cơ giới, có thể đáp ứng nhu cầu của một bộ phận dân cư nhưng chưa chắc đã tạo dựng được đời sống cộng đồng phong phú. Một quảng trường mở, thân thiện, dễ tiếp cận có thể trở thành nơi tổ chức sự kiện văn hóa, hoạt động thể thao, biểu diễn nghệ thuật, không gian sáng tạo và là nơi gặp gỡ, giao lưu giữa con người với con người. Một quảng trường bị chia cắt bởi giao thông, thiếu bóng mát cây xanh, thiếu chỗ ngồi cho người đi dạo và không có hoạt động phù hợp với cộng đồng, thì đó chỉ là một khoảng trống trên bản đồ quy hoạch. Sự khác biệt đó cho thấy, kiến trúc không chỉ tạo ra hình thức vật chất mà còn tạo ra những điều kiện để văn hóa hiện diện cùng đời sống. Vì thế, nếu phát huy sức mạnh văn hóa, rất cần quan tâm đến những không gian gần gũi nhất với đời sống nhân dân. Đó chính là nơi văn hóa không đứng ngoài cuộc sống mà hòa vào cuộc sống.

Kiến trúc có khả năng nuôi dưỡng ký ức và ý thức thuộc về cộng đồng:

Từ cổ xưa đến nay, con người không chỉ cần một nơi để cư trú, mà còn cần một nơi để thuộc về. Cảm giác thuộc về được hình thành khi mỗi người nhận thấy mình có mối liên hệ với nơi chốn đang sống; có những ký ức chung với người khác; có cơ hội tham gia vào đời sống cộng đồng; được tôn trọng và được thừa nhận như một thành viên của xã hội. Kiến trúc và không gian đô thị góp phần tạo nên cảm giác đó. Một ngôi đình làng không chỉ là một công trình kiến trúc truyền thống mà còn là nơi lưu giữ lịch sử của làng. Một khu phố cổ không chỉ là một tập hợp những ngôi nhà cũ, mà còn là nơi lưu giữ những nghề truyền thống, mối quan hệ xã hội và ký ức của nhiều thế hệ cùng tồn tại. Một công viên được người dân sử dụng thường xuyên có thể trở thành địa điểm gắn với những kỷ niệm gia đình, bạn bè và các hoạt động cộng đồng. Khi một không gian có ý nghĩa với nhiều người, nó đã vượt ra ngoài giá trị vật chất để trở thành tài sản văn hóa chung của cộng đồng. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh đô thị hóa nhanh, hàng triệu người rời quê hương đến các đô thị, các khu công nghiệp và khu đô thị mới để học tập, làm việc, sinh sống. Họ có thể có nhà ở, có việc làm, có những điều kiện vật chất tốt hơn ở quê nhưng chưa chắc đã có ngay cảm giác gắn bó với nơi mình đến sống. Một khu đô thị mới có thể hoàn thành về hạ tầng trong vài năm, nhưng để có một cộng đồng thực sự phải cần nhiều năm để hình thành. Muốn rút ngắn khoảng cách đó, ngoài các dịch vụ thiết yếu, cần có những không gian tạo điều kiện để người dân gặp gỡ tương tác, tham gia các hoạt động chung và cùng xây dựng những ký ức mới. Bởi vậy, kiến trúc cần được nhìn nhận như một phương tiện góp phần hình thành cộng đồng, chứ không chỉ là công cụ đáp ứng nhu cầu xây dựng.

Một trung tâm văn hóa cộng đồng mở cửa cho nhiều nhóm dân cư sử dụng; một công viên mà mọi lứa tuổi, người khuyết tật đều có thể dễ dàng tiếp cận; một quảng trường tổ chức các hoạt động văn hóa của nhiều dân tộc; một thư viện công cộng nơi mọi người được học tập, trao đổi và sáng tạo tất cả đều có thể góp phần tạo dựng môi trường xã hội cởi mở, bình đẳng và gắn kết.

Ngược lại, nếu không gian đô thị bị phân chia quá mức theo thu nhập, nếu người nghèo bị đẩy xa các dịch vụ thiết

yếu, nếu các không gian công cộng ngày càng bị thương mại hóa hoặc chỉ phục vụ cho một nhóm người nhất định, thì sự chia cắt về không gian có thể làm gia tăng khoảng cách xã hội.

Vì vậy, vấn đề không chỉ là xây dựng bao nhiêu công trình văn hóa, mà là ai có thể sử dụng chúng, ai được hưởng lợi từ chúng và chúng có thực sự tạo điều kiện cho mọi người tham gia đời sống cộng đồng hay không.

GIỮ GÌN BẢN SẮC KIẾN TRÚC VIỆT NAM KHÔNG CHỈ BẢO TỒN QUÁ KHỨ MÀ CÒN KIẾN TẠO TƯƠNG LAI

Bản sắc kiến trúc Việt Nam:

Bản sắc kiến trúc Việt Nam được hình thành qua hàng ngàn năm lịch sử lâu dài, từ điều kiện tự nhiên, khí hậu nhiệt đới gió mùa, địa hình đa dạng, phương thức sản xuất, tổ chức cộng đồng, phong tục tập quán, tín ngưỡng, quan niệm thẩm mỹ và sự giao lưu với các nền văn hóa khác. Bản sắc ấy thể hiện trong cách tổ chức không gian, tỷ lệ công trình, vật liệu xây cất, kỹ thuật xây dựng, hình thức mái, bố cục sân vườn, hiên nhà, mối quan hệ giữa ngôi nhà với đường làng, ao hồ, cây xanh và cảnh quan tự nhiên. Bản sắc còn thể hiện trong cách con người sử dụng không gian, tổ chức sinh hoạt gia đình, quan hệ hàng xóm và gắn kết cộng đồng. Tuy nhiên, bản sắc không thể chỉ nhận diện qua một số chi tiết kiến trúc, như mái cong, họa tiết trang trí truyền thống, màu sắc dân gian hay sao chép một kiểu kiến trúc cổ…

Một công trình có thể sử dụng nhiều mô-típ truyền thống nhưng vẫn xa lạ với văn hóa Việt Nam nếu không phù hợp với khí hậu, không gian sống, tập quán sử dụng và cảnh quan, địa hình nơi nó hiện diện. Ngược lại, một công trình sử dụng ngôn ngữ kiến trúc hiện đại, vật liệu mới và công nghệ tiên tiến, được hình thành từ sự thấu hiểu sâu sắc địa phương, con người và các giá trị văn hóa bản địa vẫn có thể mang bản sắc Việt Nam. Vì vậy, bản sắc thực chất là những giá trị đã được chuyển hóa thành tư duy thiết kế, cách tổ chức không gian, giải pháp thích ứng với tự nhiên, quan hệ xã hội và trải nghiệm của con người. Sự mô phỏng hình thức chỉ tạo ra vẻ ngoài gợi nhớ quá khứ, mà chưa chắc giữ được những giá trị làm nên sức sống của kiến trúc truyền thống.

Giữ gìn bản sắc không đồng nghĩa với việc buộc kiến trúc phải lặp lại những hình thức của quá khứ. Điều quan trọng là phải biết nhận diện, chọn lọc và phát triển những giá trị cốt lõi để chúng tiếp tục phát huy trong cuộc sống hôm nay.

Bảo tồn di sản kiến trúc gắn với bảo tồn môi trường văn hóa sống:

Nước ta có hệ thống di sản kiến trúc phong phú, từ các khu phố cổ, đô thị lịch sử, làng cổ, cung điện, thành quách, đình chùa, nhà cổ đến những công trình kiến trúc hiện đại có giá trị. Đó là nguồn lực quan trọng để giáo dục truyền thống, phát triển du lịch văn hóa, thúc đẩy công nghiệp văn hóa, kinh tế và nâng cao lòng yêu nước, niềm tự hào dân tộc. Giữ gìn bản sắc không thể tách rời việc bảo vệ môi trường tự nhiên, bởi cảnh quan sông hồ, cây xanh, địa hình và điều kiện khí hậu là những thành tố quan trọng hình thành nên văn hóa nơi chốn. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, đô thị hóa và áp lực môi trường gia tăng, kiến trúc cần hướng đến tiết kiệm năng lượng, sử dụng tài nguyên hiệu quả, sử dụng vật liệu phù hợp, giảm phát thải trong vòng đời công trình và thích ứng với các rủi ro bởi biến đổi khí hậu.

Một ngôi làng cổ nếu chỉ giữ lại một số ngôi nhà nhưng mất đi cấu trúc không gian làng như ao hồ, đường làng, vườn cây, cây cổ thụ, không gian công cộng, điểm sinh hoạt cộng đồng và sinh kế của người dân thì giá trị văn hóa bị suy giảm đáng kể. Một khu phố lịch sử nếu chỉ có mặt tiền cổ để phục vụ du lịch, trong khi cư dân nơi đây bị di đi nơi khác, những nghề truyền thống biến mất và các quan hệ cộng đồng bị đứt gãy, thì việc bảo tồn chỉ đạt được một phần. Do đó, bảo tồn cần được thực hiện trên cơ sở tiếp cận tổng thể bao gồm di sản vật thể, di sản phi vật thể, cảnh quan và cộng đồng đang duy trì sức sống của di sản.

Đối với những khu vực cần cải tạo, phải nghiên cứu kỹ khả năng thích ứng của công trình cũ với nhu cầu hiện đại, thay vì phá bỏ để nhường chỗ cho công trình mới. Nhiều ngôi nhà cổ khi được cải tạo đáp ứng tiêu chuẩn an toàn, vệ sinh, tiện nghi và hiệu quả sử dụng mà vẫn giữ được cấu trúc, tỷ lệ và những yếu tố có giá trị kiến trúc và văn hóa bản địa. Trường hợp không thể bảo tồn toàn bộ, cần xác định rõ yếu tố nào có thể thích nghi, yếu tố nào cần được tư liệu hóa trước khi thay đổi. Quyết định này phải dựa trên nghiên cứu chuyên môn, quy định của pháp luật và sự tham vấn của cộng đồng.

Bảo tồn không có nghĩa là đóng băng một không gian trong quá khứ. Bảo tồn là tạo điều kiện để di sản tiếp tục sống, được sử dụng phù hợp và được trao truyền cho các thế hệ sau.

Phát triển kiến trúc đương đại có bản sắc, tránh khuynh hướng cực đoan:

Trong quá trình hiện đại hóa và hội nhập quốc tế, kiến trúc Việt Nam đứng trước hai nguy cơ:

Thứ nhất, là xu hướng sao chép máy móc những hình thức kiến trúc ngoại nhập, coi sự hiện đại đồng nghĩa với sử dụng hình thức kiến trúc quốc tế phổ biến, sử dụng vật liệu đắt tiền, kiến trúc có quy mô lớn, to cao, hoành tráng…

Thứ hai, là xu hướng phục cổ hình thức (nhại cổ), đưa mái đình, mái chùa, họa tiết trang trí truyền thống vào công trình một cách khiên cưỡng.

Cả hai khuynh hướng trên đều làm giảm khả năng sáng tạo của kiến trúc sư và xa lạ với văn hóa và con người Việt Nam.

Vì thế, con đường phát triển của kiến trúc Việt Nam là sáng tạo trên nền tảng hiểu biết sâu sắc về truyền thống và yêu cầu thực tiễn của đời sống đương đại.

Bản sắc không phải là bộ quy tắc hình thức áp đặt cho mọi công trình. Bản sắc của vùng đồng bằng Bắc bộ không hoàn toàn giống bản sắc vùng núi phía Bắc; kiến trúc vùng duyên hải miền Trung không thể đồng nhất với kiến trúc Tây Nguyên, Nam Bộ hay các vùng sông nước ĐBSCL. Mỗi vùng miền cần được khuyến khích phát huy những đặc trưng riêng, đồng thời tôn trọng tính đa dạng văn hóa của các dân tộc trên đất nước ta. Bản sắc Việt Nam không phải là một

hình ảnh đơn nhất. Đó là sự thống nhất được hình thành từ nhiều sắc thái văn hóa, nhiều điều kiện tự nhiên và nhiều cách sống khác nhau. Chính sự đa dạng ấy làm nên sức sống của văn hóa Việt Nam, kiến trúc Việt Nam.

Bảo tồn phải đi cùng sức sống của cộng đồng:

Nhiều đô thị lịch sử trên thế giới cho thấy việc bảo tồn hiệu quả cần gắn với duy trì hoạt động đời sống, nghề truyền thống, nhà ở, dịch vụ và các quan hệ xã hội tại chỗ. Kinh nghiệm từ những đô thị di sản ở châu Âu, châu Á và đô thị cổ Hội An của Việt Nam cho thấy, giá trị của một khu phố cổ không chỉ nằm trong những công trình được tu bổ, mà còn ở tính liên tục của đời sống đô thị. Nếu mọi công trình cổ được biến thành khách sạn, cửa hàng lưu niệm hoặc điểm tham quan, trong khi cư dân bản địa và các hoạt động đời thường dần biến mất, thì khu vực đó có thể vẫn đẹp về hình thức, nhưng đã nghèo đi về văn hóa sống. Bảo tồn không nên biến di sản thành sân khấu để trình diễn quá khứ, mà phải để người dân tiếp tục sống, làm việc, kinh doanh phù hợp và tham gia giữ gìn di sản. Những ví dụ nêu trên cho thấy một điểm chung, đó là giá trị của kiến trúc được phát huy mạnh mẽ nhất khi không gian vật chất được kết nối với đời sống thực tế của con người.

Một trong những nguyên nhân khiến nhiều không gian kiến trúc có giá trị bị biến đổi, hoặc sử dụng không đúng mục đích là nhận thức của xã hội về kiến trúc, về cảnh quan và về lao động sáng tạo của kiến trúc sư. Giáo dục văn hóa kiến trúc cần được coi là một phần của giáo dục văn hóa nói chung, giúp người dân hiểu rằng, kiến trúc không chỉ là công việc của kiến trúc sư mà còn liên quan đến quyền lợi và trách nhiệm của người dân, của cộng đồng với môi trường sống. Đặc biệt, cần giúp cộng đồng phân biệt giữa sự hoành tráng về hình thức với giá trị thực chất của kiến trúc; giữa việc sử dụng họa tiết truyền thống với sự kế thừa có chiều sâu văn hóa; giữa một không gian được xây dựng đẹp mắt với một không gian thực sự phục vụ cộng đồng.

Khi nhận thức xã hội về văn hóa kiến trúc được nâng cao, nhu cầu về kiến trúc có chất lượng và bản sắc sẽ trở thành một động lực quan trọng thúc đẩy đổi mới hoạt động thiết kế và quản lý phát triển.

KẾT LUẬN

Bản sắc kiến trúc Việt Nam không có mẫu thiết kế áp dụng chung cho các vùng miền, địa phương mà chỉ có những tiêu chí cơ bản để từ đó được kiến trúc sư vận dụng sáng tạo trong thiết kế của mình. Cần nghiên cứu sâu hơn những đặc trưng của từng vùng sinh thái - văn hóa từ đồng bằng, trung du, miền núi đến vùng duyên hải và vùng sông nước; từ kiến trúc của người Kinh đến kiến trúc truyền thống của các dân tộc thiểu số. Đối với miền núi, cần quan tâm đến địa hình, vật liệu địa phương, tập quán cư trú, khí hậu và không gian sinh hoạt cộng đồng của từng dân tộc. Đối với đồng bằng Bắc Bộ, cần nghiên cứu mối quan hệ giữa nhà ở, sân vườn, đường làng, ao hồ và cấu trúc làng truyền thống. Đối với miền Trung, cần chú trọng thích ứng với bão, lũ, nắng nóng, địa hình ven biển và những di sản đô thị đặc thù. Đối với Nam Bộ và ĐBSCL, cần quan tâm đến hệ thống sông nước, khả năng thích ứng với ngập, lụt, sinh kế và văn hóa cư trú gắn với mặt nước. Sự đa dạng ấy phải được phản ánh trong quy hoạch và thiết kế công trình, thay vì bị xóa nhòa bởi các mô hình phát triển đồng dạng. Cần có sự hợp tác giữa kiến trúc sư với các nhà văn hóa, sử học, nhân học, sinh thái học và cộng đồng địa phương, bởi chỉ khi đó bản sắc mới được nhận diện đầy đủ, mang hơi thở đời sống chứ không phải được nhận diện từ bàn làm việc của nhà thiết kế. Cần tiếp tục rà soát, nhận diện và đánh giá giá trị của các di sản kiến trúc, bao gồm cả những công trình chưa được xếp hạng nhưng có giá trị đặc biệt về nghệ thuật, văn hóa, lịch sử, cảnh quan và ký ức cộng đồng. Cần có cơ chế khuyến khích cải tạo thích ứng, tái sử dụng công trình cũ, bảo tồn những yếu tố có giá trị với sự tham gia của cộng đồng. Đối với các khu vực di sản có áp lực phát triển lớn, cần giải quyết hài hòa lợi ích giữa bảo tồn, sinh kế của cư dân với phát triển dịch vụ và quản lý đô thị. Không thể chỉ yêu cầu người dân hy sinh quyền lợi để giữ gìn di sản, nhưng cũng không thể lấy lợi ích kinh tế ngắn hạn làm lý do để xóa bỏ những giá trị không thể phục hồi. Bảo tồn cần được xem là khoản đầu tư dài hạn cho văn hóa, môi trường và phát triển của địa phương.

Trong kỷ nguyên số, công nghệ mở ra nhiều cơ hội để lưu trữ di sản, số hóa tư liệu kiến trúc, xây dựng bản đồ văn hóa, giới thiệu di tích và tổ chức các hoạt động sáng tạo. Tuy nhiên, chuyển đổi số không thể thay thế không gian văn hóa vật chất hoặc giải quyết mọi vấn đề của cộng đồng. Vì vậy, công nghệ cần được sử dụng để bổ trợ cho không gian sống, tăng cường khả năng tiếp cận văn hóa và hỗ trợ sự tham gia của người dân trong giữ gìn di sản, chứ không làm giảm nhu cầu tương tác trực tiếp giữa người dân với di sản và giữa di sản với cộng đồng.

Khi kiến trúc được đặt trong mối quan hệ hữu cơ với văn hóa và con người, thì những công trình mọc lên không chỉ có giá trị sử dụng mà còn có khả năng nuôi dưỡng tinh thần; những không gian được quy hoạch sẽ không chỉ đáp ứng yêu cầu phát triển mà còn tạo điều kiện cho sự gắn kết xã hội; những đô thị và làng quê được cải tạo sẽ không chỉ hiện đại hơn mà còn giữ được ký ức bản sắc và tình cảm cộng đồng. Và khi đó kiến trúc sẽ thực sự trở thành một nguồn lực quan trọng góp phần phát huy sức mạnh văn hóa dân tộc, xây dựng một Việt Nam phát triển, văn minh, giàu bản sắc, nhân văn và hạnh phúc trong kỷ nguyên mới dưới sự lãnh đạo của Đảng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- Nghị quyết 33-NQ/TW ngày 09/6/2014 của BCHTW Đảng khóa XI về xây dựng và phát triển văn hóa, con người Việt Nam đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững đất nước;
- Nghị quyết 80-NQ/TW ngày 07/01/2026 của Bộ Chính trị về phát triển văn hóa Việt Nam;
- Luật Kiến trúc;
- Luật Di sản văn hóa;
- UNESCO (2011) - Khuyến nghị về cảnh quan đô thị lịch sử;
- UNESCO (2016) - Báo cáo toàn cầu về văn hóa và phát triển bền vững.

PHÁT TRIỂN KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ 3D TẠI HÀ NỘI:

Từ thể chế đến cơ chế bồi thường và quy hoạch tích hợp



TS.KTS NGUYỄN TẤT THẮNG*



THS ĐỖ LÊ TÂN**

Sự khan hiếm quỹ đất bề mặt tại Thủ đô Hà Nội đang thúc đẩy nhu cầu cấp thiết về chuyển đổi mô hình quản lý đô thị từ mặt phẳng 2D sang thể tích 3D (bao gồm cả chiều sâu trong lòng đất và khoảng không trên cao). Việc triển khai các dự án hạ tầng ngầm (như Metro, hào kỹ thuật…) và hạ tầng nổi (đường trên cao) hiện gặp rất nhiều rào cản lớn do xung đột lợi ích giữa nhà nước, cư dân hiện hữu và yêu cầu bảo tồn di sản văn hóa…

Bài báo nghiên cứu thiết lập mô hình quản trị không gian 3D tích hợp cho Hà Nội dựa trên 3 trụ cột: Khung thể chế, Cơ chế bồi thường quyền không gian và Quy hoạch tích hợp đa tầng (TOD 3D). Bằng phương pháp tổng hợp, đối chiếu kinh nghiệm quốc tế (bao gồm Luật Không gian ngầm sâu Nhật Bản, mô hình RESO Montreal và Quản trị địa chính 3D Singapore) - nghiên cứu sẽ chỉ ra các khoảng trống pháp lý, bất cập bồi thường và tình trạng phân mảnh dữ liệu tại Hà Nội. Từ đó, đề xuất hệ thống giải pháp toàn diện gồm: (1) Luật hóa ngưỡng không gian công cộng và khung đền bù hạn chế quyền phát triển; (2) Quy hoạch phân lớp chiều sâu gắn với phát triển TOD 3D và hành lang bảo vệ di sản; (3) Số hóa cơ sở dữ liệu Địa chính 3D (3D Cadastre) trên nền tảng Digital Twin tích hợp BIM-GIS.

1. TỪ ĐÔ THỊ BỀ MẶT ĐẾN THÀNH PHỐ ĐA TẦNG

Theo các nguồn dữ liệu hiện có, trong khu vực nội đô lịch sử Hà Nội (bao gồm các phường Ba Đình, Hoàn Kiếm, Đống Đa, Hai Bà Trưng), mật độ dân số trung bình đạt từ 25.000 - 35.000 người/km^2, quỹ đất dành cho giao thông và không gian công cộng chỉ đạt dưới 10 - 12%. Với sự khan hiếm nghiêm trọng của quỹ đất bề mặt, việc khai thác không gian theo chiều dọc - ngầm hóa hạ tầng và kết nối không gian nổi không còn là lựa chọn lý thuyết mà là bắt buộc trong phát triển, nhằm từng bước hiện đại hóa đô thị.

Tuy nhiên, tiến trình phát triển không gian 3D tại Hà Nội đang đối mặt với những xung đột mang tính hệ thống, có thể nhận diện được ngay và tổng hợp sau đây:

+ Sự bế tắc trong bồi thường giải phóng mặt bằng: Các tuyến đường sắt đô thị ngầm (ví dụ như Metro đoạn Kim Mã - Ga Hà Nội) hay đường sắt/đường trên cao (vành đai 2, vành đai 3) khi đi qua dưới/hoặc trên nhà dân, thường gây ra lo ngại về lún nứt, chấn động và tổn thất "quyền phát triển" (ví dụ như không được đào móng sâu, hạn chế số tầng theo chiều cao…) nhưng thiếu cơ sở định giá đền bù thỏa đáng.

+ Xung đột giữa hạ tầng và bảo tồn di sản: Việc khoan hầm hay xây công trình nổi, sát các vùng bảo vệ di sản (như khu Hoàng thành Thăng Long, phố Cổ, các di tích lịch sử văn hóa…) tiềm ẩn nguy cơ làm suy chuyển cấu trúc di sản gốc và phá vỡ cảnh quan truyền thống.

+ Sự rời rạc trong quy hoạch và quản lý dữ liệu: Hạ tầng ngầm/nổi thường chủ yếu được đầu tư theo tư duy dự án đơn lẻ, thiếu kết nối liên hoàn giữa tầng hầm các tòa nhà với ga đường sắt, dữ liệu hạ tầng bị phân mảnh theo cơ chế mạnh ai nấy quản lý…

Cốt lõi của các vướng mắc này vốn xuất phát từ tư duy quản lý địa chính 2D truyền thống, nơi quyền sử dụng đất được coi là hình chiếu bằng của thửa đất. Do đó, việc nghiên cứu xây dựng mô hình phát triển không gian đô thị 3D dựa trên ba trụ cột: Thể chế - Cơ chế chính sách bồi thường - Quy hoạch tích hợp là chìa khóa cấp thiết để khai mở giá trị kinh tế ẩn trong lòng đất và không trung của Thủ đô.

2. TỔNG QUAN LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH QUỐC TẾ

2.1. Khung lý thuyết cốt lõi

Lý thuyết Đô thị thể tích (Volumetric Urbanism): Với việc nhìn nhận đô thị như một khối thể tích 3D bao gồm không gian trên cao (Air Rights), mặt đất (Surface Rights) và tầng ngầm (Subsurface Rights). Bất động sản được tách biệt thành các quyền tài sản độc lập theo chiều cao/chiều sâu. (Hình 1)

Mô hình Quy hoạch đa tầng tích hợp (TOD 3D): Mở rộng lý

(*) (**) *Khoa Kiến trúc và Xây dựng, Trường Đại học INTRACOM*



Đô thị thể tích gắn với quy hoạch 3D và quyền sở hữu không gian.

thuyết TOD truyền thống bằng việc kết nối các ga giao thông công cộng ngầm/nổi với bãi đỗ xe, trung tâm thương mại ngầm, tầng hầm của nhà cao tầng, lối đi bộ ngầm bên dưới và hệ thống cầu vượt bộ hành kết nối với các khối đế, khối bệ bên trên…

Cơ chế khai thác giá trị chênh lệch địa tầng (Land Value Capture - LVC): Trên cơ sở thu lại phần giá trị bất động sản gia tăng do việc nhà nước đầu tư hạ tầng đa tầng mang lại, thông qua các công cụ như chuyển nhượng quyền phát triển (TDR - Transfer of Development Rights) và đấu giá quyền không gian (Auction of Spatial / Air / Subsurface Rights).

2.2. Bài học kinh nghiệm quốc tế

Nhật Bản với Luật sử dụng không gian ngầm sâu (2000): Quy định cấp độ sâu dưới 40 m (hoặc dưới 10 m tính từ móng cọc công trình hiện hữu) là tài nguyên công cộng. Chính phủ có quyền thi công các tuyến hầm Metro, hạ tầng kỹ thuật ở tầng sâu này mà không phải xin phép hay bồi thường giải phóng mặt bằng cho chủ đất bề mặt.

Montreal (Canada) với Thành phố ngầm RÉSO: Bằng việc phát triển mạng lưới đi bộ ngầm hơn 32 km, kết nối 10 ga Metro và hàng ngàn cơ sở thương mại thông qua mô hình hợp tác Công - Tư (PPP), trong đó nhà nước quy hoạch hầm khung, tư nhân với nghĩa vụ kết nối tầng hầm vào mạng lưới chung.

Singapore và Hong Kong - mạng lưới kết nối đa tầng ngầm - nổi: Hong Kong phát triển hệ thống cầu đi bộ trên không (Footbridge Network) nối liền các khối đế tòa nhà với hệ thống MTR - Mass Transit Railway (hệ thống đường sắt giao thông khối lượng lớn / tàu điện ngầm Hong Kong), nhằm giải phóng hoàn toàn vỉa hè mặt đất cho cây xanh. Trong khi đó, Singapore áp dụng Luật Đất đai sửa đổi (Land Acquisition Act) cho phép nhà nước thu hồi "phần thể tích không gian ngầm" dưới nhà dân để làm hầm giao thông/thoát nước sâu mà không cần thu hồi toàn bộ thửa đất bề mặt, đi kèm cơ chế bồi thường tổn thất quyền phát triển rất minh bạch.

3. THỰC TRẠNG VÀ THÁCH THỨC TẠI ĐÔ THỊ LỊCH SỬ HÀ NỘI

3.1. Khoảng trống Thể chế và Định giá quyền không gian 3D

Luật Đất đai 2024 và Luật Thủ đô 2024 đã bước đầu ghi nhận việc sử dụng không gian ngầm và trên cao, tuy nhiên các văn bản dưới luật vẫn chưa thể chế hóa đầy đủ, có thể tóm tắt với những nội dung chính sau đây:

+ Thiếu quy định ngưỡng không gian công cộng: Trong các bộ luật hoặc các văn bản pháp lý hướng dẫn có liên quan, chưa xác định rõ độ sâu hay độ cao bao nhiêu thuộc quyền quản lý công cộng toàn dân, dẫn đến tranh chấp pháp lý khi công trình ngầm chui qua lòng đất dưới nhà dân.

+ Thiếu Bộ tiêu chuẩn định giá quyền không gian: Chưa có công thức tài chính xác định mức giảm giá trị của bất động sản bề mặt khi bị hạn chế chiều sâu đào móng hoặc chiều cao xây dựng do hạ tầng công cộng đi qua. Mức hỗ trợ hiện áp dụng mang tính cảm quan, thiếu cơ sở khoa học.

3.2. Xung đột lợi ích thực tiễn tại khu dân cư và di sản

+ Rủi ro đối với nhà ở riêng lẻ: Kiến trúc nội đô Hà Nội chủ yếu là nhà ống móng nông/móng cọc ngắn. Quá trình thi công TBM - Tunnel Boring Machine (máy khoan hầm), ví dụ Metro số 3 đoạn Kim Mã - Ga Hà Nội, gây lo ngại lớn về lún nứt công trình, đồng thời khống chế quyền ép cọc sâu của cư dân trong tương lai nhưng thiếu cơ sở bồi thường.

+ Thách thức đối với vùng bảo vệ di sản: Cho đến nay, vẫn tranh luận kéo dài chưa có hồi kết về vị trí Ga ngầm C9 (Metro số 2) sát Đền Ngọc Sơn - hồ Hoàn Kiếm, phản ánh sự lúng túng khi xử lý mối quan hệ giữa hạ tầng hiện đại và di tích, di sản văn hóa…

3.3. Sự phân mảnh dữ liệu hạ tầng

Dữ liệu công trình ngầm của Hà Nội hiện bị chia rẽ giữa các ngành (điện, nước, viễn thông…). Thiếu bản đồ hiện trạng công trình ngầm 3D và cơ sở dữ liệu địa chất thủy văn thống nhất, khiến các tuyến Metro bỏ lỡ cơ hội kết nối tầng

Bảng 1

Phân lớp không gian	Độ sâu / Độ cao	Cơ chế quản lý và Mục tiêu quy hoạch
Tầng trên không (+50m trở lên)	Overpass / Skybridge	Quản lý bằng cơ chế TDR; xây dựng đường sắt trên cao, cầu bộ hành kết nối khối bệ tòa nhà.
Tầng bề mặt (0m)	Ground surface	Địa chính 2D truyền thống; ưu tiên không gian đi bộ, cây xanh và di sản văn hóa.
Tầng ngầm nông (0m đến -30m)	Subsurface (Shallow)	Cấp quyền sử dụng đất đa tầng; bồi thường theo tỷ lệ ảnh hưởng; phát triển thương mại ngầm, bãi đỗ xe và TOD.
Tầng ngầm sâu (Dưới -30m)	Deep Subsurface	Quyền sở hữu thuộc nhà nước hoàn toàn; phát triển metro, hào kỹ thuật, bồn chứa nước chống ngập…



Quy hoạch tích hợp đa tầng TOD 3D và bảo tồn di sản nội đô Hà Nội.

hầm trực tiếp vào các trung tâm thương mại/chung cư xung quanh…

4. ĐỀ XUẤT HỆ THỐNG GIẢI PHÁP PHÁT TRIỂN KHÔNG GIAN 3D TẠI HÀ NỘI

Với thực trạng và bài học kinh nghiệm từ các nước như đã phân tích - Nghiên cứu hướng tới việc đề xuất hệ thống giải pháp đồng bộ gồm 3 trụ cột cốt lõi:

4.1. Khung thể chế và bồi thường quyền không gian 3D

Cụ thể hóa ngưỡng không gian công cộng

+ Ngưỡng không gian ngầm công cộng: Đề xuất quy định độ sâu từ -30 m trở xuống (hoặc dưới -10 m tính từ móng cọc hợp pháp của công trình bề mặt tùy từng khu vực) là tài nguyên công cộng, do nhà nước quản lý hoàn toàn. Tại các độ sâu này, nhà nước được cấp phép xây dựng hạ tầng công cộng mà không phải bồi thường đất bề mặt.

+ Ngưỡng không gian trên cao công cộng: Khoảng không vượt quá giới hạn tầng cao tối đa theo quy hoạch phân khu được duyệt thuộc quyền quản lý công cộng.

Công thức bồi thường tổn thất hạn chế quyền không gian

Trên cơ sở phương pháp định giá tổn thất quyền tài sản đa tầng (Injurious Affection and Partial Taking Valuation) của Hiệp hội Định giá Quốc tế (IVSC) và kinh nghiệm xây dựng hệ số chiết khấu không gian của Singapore (SLA, 2021), cùng các nghiên cứu của Cui and cs. (2019) - Mức đền bù tổn thất do bị hạn chế quyền không gian ngầm/nổi (ΔV) được mô hình hóa theo công thức sau:

Đối với tầng ngầm (từ 0 m đến -30 m) hoặc khoảng không nổi bị dự án công cộng đi qua làm hạn chế quyền sử dụng đất nhưng không thu hồi mặt bằng, áp dụng công thức bồi thường:

$\Delta V = V0 \times (K1 + K2)$

Trong đó:

ΔV: mức đền bù hạn chế quyền không gian cho chủ sở hữu đất.

V0: giá trị quyền sử dụng đất bề mặt theo giá thị trường.

K1: hệ số tổn thất do hạn chế khả năng phát triển chiều sâu/xây cao tầng (0,15 - 0,3).

K2: hệ số rủi ro do chấn động, tiếng ồn và ô nhiễm thị giác (0,05 - 0,15).

Ví dụ minh họa số học: giả sử một căn nhà mặt phố có diện tích 100 m^2, giá thị trường hiện tại là 100 triệu VNĐ/m^2.

Tổng giá trị bề mặt V0 = 10 tỷ VNĐ.

Một dự án đường sắt đô thị ngầm chạy qua độ sâu -15 m ngay dưới móng nhà, khiến nhà này từ tối đa được xây 7 tầng có hầm nay chỉ được xây tối đa 3 tầng không hầm.

Xác định V0 = 10.000.000.000VNĐ.

Do mất hoàn toàn khả năng xây cao tầng và làm hầm, chọn mức tổn thất tối đa: K1 = 0,3.

Do tàu chạy ngầm có thể gây rung chấn nhẹ định kỳ, chọn mức rủi ro trung bình: K2 = 0,07.

Tính toán bồi thường:

ΔV =10.000.000.000 x (0,30+0,07) = 3.700.000.000 (VND)

Như vậy, dù nhà nước không thu hồi một mét vuông đất mặt bằng nào, chủ nhà vẫn được bồi thường 3,7 tỷ VNĐ cho phần quyền không gian bị hạn chế. (Hình 6)

Ứng dụng cơ chế chuyển nhượng Quyền phát triển (TDR) - Transfer of Development Rights

Cho phép chủ sở hữu nhà đất trong khu di sản (bị hạn chế chiều cao) hoặc bị công trình ngầm/nổi đi qua, được chuyển nhượng chỉ tiêu diện tích sàn xây dựng (FAR - Floor Area Ratio) chưa sử dụng cho các dự án ở vùng đô thị mới, đảm bảo hài hòa lợi ích kinh tế mà không làm chất tải dân số vào lõi đô thị lịch sử.

4.2. Quy hoạch tích hợp đa tầng (TOD 3D) và bảo tồn di sản

Phân lớp chiều sâu đô thị thống nhất (Bảng 1)

Phát triển nút giao thông đa tầng quanh ga Metro (TOD 3D)

Bắt buộc lập quy hoạch không gian ngầm tích hợp tỷ lệ 1/500 cho các ga Metro nội đô. Thiết kế các lối kết nối trực tiếp (Tunnel-to-Building) từ tầng hầm ga Metro vào tầng hầm các tòa nhà thương mại lân cận, tạo thành hệ thống thương mại - đi bộ ngầm liên hoàn.

Hành lang bảo vệ di sản đa tầng

+ Không gian nổi: Cấm tuyệt đối xây dựng cầu vượt, đường trên cao chắn tầm nhìn (Visual Corridors) di sản.

+ Không gian ngầm: Thiết lập bán kính an toàn địa chất tối thiểu 50m từ chân di sản. Bắt buộc lập đánh giá tác động Di sản - HIA (Heritage Impact Assessment) và kiểm soát rung chấn thi công TBM dưới ngưỡng cho phép đối với kết cấu cổ, cũ.

4.3. Số hóa địa chính 3D và bản sao số đô thị (Digital Twin)

Xây dựng cơ sở dữ liệu địa chính 3D (3D Cadastre): Chuyển đổi từ quản lý 2D sang mô hình 3D. Cấp giấy chứng nhận quyền sử dụng đất đa tầng thể hiện rõ tọa độ (X, Y, Z) của móng công trình, không gian ngầm và khoảng không trên cao.

Phát triển Digital Twin tích hợp BIM-GIS: Số hóa toàn bộ địa chất thủy văn, công trình ngầm và hạ tầng nổi. Ứng dụng Digital Twin giúp mô phỏng chấn động thi công, dòng chảy nước ngầm và tự động phát hiện xung đột không gian (Clash Detection) giữa đường hầm Metro với móng nhà dân trước khi phê duyệt dự án.

5. KHUYẾN NGHỊ CHÍNH SÁCH VÀ KẾT LUẬN

Khuyến nghị chính sách

Bộ Nông nghiệp và Môi trường: Sớm ban hành thông tư hướng dẫn về định giá và quản lý thửa đất 3D (3D Parcel), quy định rõ ngưỡng ngầm và nổi công cộng.

UBND TP Hà Nội: Thí điểm ban hành quy định quản lý và bồi thường quyền sử dụng không gian ngầm/trên cao tại khu vực nội đô lịch sử; Thành lập cơ quan đầu mối quản lý không gian đô thị 3D thuộc Thành phố; Ưu tiên ngân sách xây dựng cơ sở dữ liệu địa chính 3D và bản sao số (Digital Twin) hạ tầng ngầm.

Chủ đầu tư và cộng đồng: Đẩy mạnh hợp tác Công - Tư (PPP) trong kết nối không gian ngầm quanh ga Metro, minh bạch thông tin quy hoạch 3D để tạo sự đồng thuận xã hội.

Kết luận

Phát triển không gian đô thị 3D là xu thế tất yếu giúp Hà Nội giải quyết triệt để bài toán nén đô thị, quá tải hạ tầng và bảo tồn di sản. Nghiên cứu đã khẳng định, việc chuyển đổi từ quản lý 2D sang 3D không chỉ là cải tiến kỹ thuật mà là sự thay đổi căn bản về tư duy thể chế, nhằm hài hòa lợi ích giữa nhà nước, doanh nghiệp và cộng đồng dân cư.

Bằng việc xác lập ngưỡng không gian ngầm công cộng (-30 m), áp dụng công thức đền bù hạn chế quyền phát triển, phát triển nút giao TOD 3D đa tầng quanh ga Metro và vận hành cơ sở dữ liệu địa chính 3D trên nền Digital Twin - Hà Nội sẽ có một công cụ quản trị hiện đại, minh bạch. Đây là cơ sở khoa học và thực tiễn cấp thiết để hoàn thiện Luật Đất đai, Luật Thủ đô và các quy chuẩn quy hoạch. Giúp Hà Nội tối ưu hóa tài nguyên không gian, phát triển bền vững nhưng vẫn gìn giữ nét đặc trưng của một đô thị di sản.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. Nghị định số 39/2010/NĐ-CP của Chính phủ về Quản lý không gian xây dựng ngầm đô thị.

2. Luật Đất đai số 31/2024/QH15

3. Luật Thủ đô số 39/2024/QH15

4. Quyết định số 913/QĐ-UBND TP Hà Nội, phê duyệt Quy hoạch chung không gian xây dựng ngầm đô thị trung tâm TP Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050

5. Singapore Land Authority (2021), 3D Cadastre Standard and Implementation Guide, SLA Publications, Singapore.

6. Cui, J., Lin, D., & Nelson, J. (2019), "Underground Pedestrian Systems from a Law and Economics Perspective", Tunnelling and Underground Space Technology, 87, 1-13.

7. Government of Japan (2000), Act on Special Measures Concerning Public Use of Deep Subsurface (Act No. 87 of 2000), Tokyo, Japan.

8. He, S., & Li, X. (2021), "Integrating BIM and GIS for 3D Underground Cadastre Management in High-density Cities", Computers, Environment and Urban Systems, 88, 101643.

9. Stoter, J., & Oosterom, P. van (2006), 3D Cadastre in an International Context: Legal, Organizational and Technical Aspects, CRC Press, Taylor & Francis Group.

10. TRB (1973), Valuation of Air Space, NCHRP Report 142, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

BIM và khả năng tái sinh công trình xây dựng



THS LÊ TÙNG LÂM*

Không có hệ thống dữ liệu nào bảo đảm mọi giá trị đã mất đều được phục hồi. Nhưng nếu tri thức được bảo tồn có hệ thống, thế hệ tương lai sẽ có thêm cơ sở để hiểu quá khứ và khôi phục những giá trị còn có thể phục hồi.

Vào chiều 15/4/2019, ngọn lửa bùng lên tại Nhà thờ Đức Bà Paris, một trong những biểu tượng kiến trúc và văn hóa nổi tiếng nhất thế giới. Chỉ trong vài giờ, phần lớn hệ mái gỗ lịch sử bị thiêu rụi, ngọn tháp nhọn sụp đổ, nhiều cấu kiện và hiện vật bị hư hại. Hơn 5 năm sau, tháng 12/2024, Nhà thờ Đức Bà mở cửa trở lại sau một quá trình phục hồi quy mô lớn. Những hình ảnh hỏa hoạn tại Tòa thị chính Limoges ở Pháp (tháng 10/2026) một lần nữa gợi lên câu hỏi: Khi một công trình xây dựng bị phá hủy, con người thực sự mất đi những gì và phải chuẩn bị những gì từ hôm nay để có thể phục hồi công trình trong tương lai?

Thoạt nhìn, câu trả lời dường như nằm ở khả năng xây dựng lại những gì đã mất. Mái bị cháy thì làm lại mái, tường bị sập thì xây lại tường, kết cấu bị hư hỏng thì gia cường hoặc thay thế. Nhưng việc phục hồi một công trình không đơn giản là tái tạo vật chất. Muốn xây dựng lại một mái nhà lịch sử, trước hết phải biết hình dạng, kích thước, cấu tạo, vật liệu, phương pháp liên kết và quan hệ của nó với những bộ phận khác. Muốn bảo tồn một công trình di sản, còn phải hiểu giá trị lịch sử, kỹ thuật xây dựng truyền thống và tính xác thực. Đằng sau mỗi công trình vật chất luôn tồn tại một hệ thống tri thức phức tạp mà nếu bị mất đi, việc phục hồi có thể trở nên vô cùng khó khăn.

Công trình xây dựng không chỉ là tập hợp bê tông, thép, gạch, đá, gỗ và các hệ thống kỹ thuật. Công trình đồng thời là một thực thể vật chất, một cấu trúc hình học, một hệ thống chức năng, một mạng lưới quan hệ, một tập hợp thông tin và một thực thể có lịch sử riêng. Vật chất có thể bị phá hủy, hình học có thể bị biến dạng, chức năng có thể bị gián đoạn, nhưng thông tin và tri thức về công trình vẫn có khả năng được bảo tồn. Chính sự bảo tồn ấy tạo ra một phần nền tảng cho khả năng phục hồi trong tương lai. Dữ liệu không thay thế công trình vật chất, nhưng có thể giúp con người hiểu rõ những gì đã mất, những gì còn lại và những gì có thể tái tạo.

Trường hợp Nhà thờ Đức Bà Paris cho thấy giá trị đặc biệt của những thông tin được hình thành trước khi thảm họa xảy ra. Tài liệu lịch sử, bản vẽ, ảnh chụp, kết quả khảo sát và dữ liệu quét laser cung cấp nguồn tham chiếu quan trọng cho công tác nghiên cứu, đánh giá và phục hồi. Các mô hình số hỗ trợ tổng hợp thông tin và phối hợp chuyên môn. Tuy nhiên, sẽ thiếu chính xác nếu cho rằng chỉ nhờ BIM mà Nhà thờ Đức Bà được phục hồi. Thành công còn phụ thuộc vào tổ chức, tài chính, nghiên cứu khoa học, hiểu biết lịch sử, kỹ thuật truyền thống và quyết định của con người. BIM là phương pháp hỗ trợ quản lý thông tin, không thay thế toàn bộ tri thức và năng lực chuyên môn.

Bài học sâu sắc hơn từ Paris nằm ở giá trị của việc chuẩn bị thông tin trước khi hỏa hoạn xảy ra. Nếu công trình chỉ bắt đầu được khảo sát và số hóa sau khi đã bị phá hủy thì nhiều thông tin có thể đã mất vĩnh viễn. Nếu các cấu kiện, hệ thống và đặc điểm quan trọng được ghi nhận từ trước, việc đánh giá và lựa chọn phương án phục hồi sẽ có cơ sở tốt hơn. Đây là sự chuyển đổi từ tư duy ứng phó sau thảm họa sang chuẩn bị năng lực phục hồi ngay trong quá trình

(*) Trưởng Ban Đô thị HĐND TP Đà Nẵng

xây dựng, vận hành và bảo trì.

BIM không đơn thuần là tạo ra một mô hình ba chiều đẹp mắt, cũng không phải chuyển bản vẽ hai chiều thành hình học ba chiều. Giá trị căn bản của BIM nằm ở khả năng tổ chức, quản lý, trao đổi và sử dụng thông tin công trình trong suốt vòng đời. Một mô hình 3D có thể thể hiện chính xác hình dạng mái nhà nhưng chưa chắc cho biết vật liệu nguyên gốc, thời điểm sửa chữa, nguồn tài liệu xác nhận cấu tạo hoặc người chịu trách nhiệm kiểm chứng. Nếu thiếu những dữ liệu đó, mô hình dù chi tiết vẫn có thể không đủ để phục vụ quyết định phục hồi. Vấn đề không phải công trình có mô hình 3D hay không, mà là có quản lý được thông tin thiết yếu hay không.

Ngành Xây dựng cần lưu giữ những thông tin gì để công trình có thể được phục hồi sau 50, 100 hoặc 200 năm? Không phải mọi dữ liệu đều có giá trị như nhau. Cần xác định bộ thông tin tối thiểu gồm danh tính công trình và các đối tượng cấu thành, vị trí, hình học, vật liệu, cấu tạo, đặc tính kỹ thuật, quan hệ không gian, quan hệ kết cấu, công năng, lịch sử thay đổi, nguồn gốc dữ liệu và mức độ tin cậy. Với công trình di sản, cần bổ sung giá trị lịch sử và yêu cầu bảo tồn.

Lưu giữ thông tin chưa đủ; thông tin phải được tổ chức để có thể tồn tại và được hiểu qua nhiều thế hệ công nghệ. Công trình có thể có tuổi thọ hàng trăm năm, trong khi phần mềm, định dạng tệp, cơ sở dữ liệu và tổ chức quản lý thay đổi nhiều lần. Nếu tri thức chỉ nằm trong một phần mềm độc quyền hoặc định dạng không còn được hỗ trợ, nguy cơ mất khả năng truy xuất rất lớn. Khả năng tái sinh đòi hỏi lưu giữ dữ liệu đồng thời bảo đảm khả năng đọc, giải thích, chuyển đổi và kiểm chứng lâu dài.

Quét laser 3D, công nghệ ảnh đo, Scan-to-BIM, GIS, cơ sở dữ liệu, công cụ kiểm tra quy tắc và trí tuệ nhân tạo mở ra khả năng mới. Dữ liệu quét hỗ trợ ghi nhận hiện trạng; ảnh lịch sử cung cấp bằng chứng về bộ phận đã mất; mô hình thông tin liên kết các nguồn; AI hỗ trợ nhận diện, phát hiện mâu thuẫn và đề xuất giả thuyết phục dựng. Nhưng một mô hình có vẻ hợp lý không đồng nghĩa với mô hình đúng. Chi tiết do AI suy luận không thể được coi là nguyên gốc nếu thiếu bằng chứng. Tương lai BIM vì thế gắn với năng lực kiểm chứng. Mỗi thông tin quan trọng cần trả lời: đến từ đâu, ai tạo lập, khi nào, đã thay đổi ra sao, ai kiểm tra, theo tiêu chí nào và bằng chứng nào xác nhận? Hệ thống phục hồi phải phân biệt dữ liệu đo đạc, dữ liệu hồ sơ, dữ liệu suy luận và dữ liệu chưa xác minh. Nếu không, mô hình số có thể tạo cảm giác chính xác trong khi chứa nhiều giả định chưa được kiểm chứng.

Tái sinh công trình còn đòi hỏi thay đổi quản trị thông tin toàn ngành. Thông tin không thể chỉ phục vụ một giai đoạn thiết kế, hợp đồng thi công hay nghiệm thu, mà phải được coi là tài sản sử dụng lâu dài. Chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu, đơn vị vận hành, cơ quan quản lý và tổ chức bảo tồn có trách nhiệm tương ứng trong tạo lập, kiểm tra, bàn giao, cập nhật và bảo quản. Khía cạnh kinh tế cần được đánh giá thận trọng. Khảo sát, số hóa, mô hình hóa và lưu trữ đều có chi phí. Không phải công trình nào cũng cần mô hình số chi tiết như nhau. Mức đầu tư phải dựa trên rủi ro, giá trị công trình và chi phí vòng đời. Để chứng minh hiệu quả BIM, cần so sánh các trường hợp có và không có dữ liệu đáng tin cậy, đo thời gian khảo sát, chi phí tái lập, sai lệch và khả năng kiểm chứng, thay vì chỉ đưa ra nhận định định tính.

Có thể tổ chức thí điểm trên một công trình nhỏ hoặc bộ phận công trình có hồ sơ đầy đủ. Sau khi thiết lập bộ dữ liệu tham chiếu, giả định mất một phần cấu kiện hoặc dữ liệu, rồi sử dụng thông tin còn lại để tái lập mô hình. Kết quả được đánh giá bằng tỷ lệ thông tin khôi phục đúng, bảo toàn danh tính và quan hệ, sai lệch hình học, thời gian, chi phí và độ tin cậy của bằng chứng. Thí điểm sẽ giúp xác định trong điều kiện nào quản lý thông tin có cấu trúc thực sự cải thiện khả năng phục hồi. Đối với Việt Nam, hướng nghiên cứu có ý nghĩa với công trình di sản, trụ sở công quyền, bệnh viện, trường học và hạ tầng kỹ thuật. Huế, Hội An và Đà Nẵng có thể lựa chọn công trình phù hợp để thí điểm. Từ một công trình, tư duy này có thể mở rộng đến đô thị. Khi thiên tai gây hư hại nhiều công trình, khả năng phục hồi còn phụ thuộc vào giao thông, điện, nước, thoát nước, thông tin liên lạc và dịch vụ thiết yếu. Kết nối BIM với GIS và dữ liệu hạ tầng có thể hỗ trợ xác định các bộ phận cần ưu tiên đánh giá và khôi phục. Nhưng chống chịu đô thị vẫn phụ thuộc vào quy hoạch, tổ chức ứng phó, nguồn lực, thể chế và cộng đồng; dữ liệu số không phải yếu tố duy nhất.

Từ Nhà thờ Đức Bà Paris đến những công trình công cộng bị hỏa hoạn, bài học lớn nhất không phải công nghệ có thể tái tạo mọi thứ đã mất. Bài học là tri thức về công trình có giá trị vượt xa thời điểm xây dựng. Một bản vẽ lưu giữ đúng cách, một cấu kiện được định danh, một thông số được kiểm chứng, một thay đổi được ghi nhận hôm nay có thể thành bằng chứng quan trọng cho quyết định của thế hệ tương lai. Ngược lại, mô hình rất chi tiết nhưng thiếu nguồn gốc, không cập nhật và không thể truy xuất vẫn có thể trở thành di sản số không sử dụng được. Ngành Xây dựng cần mở rộng tư duy từ xây dựng công trình có tuổi thọ dài sang bảo tồn tri thức về công trình trong thời gian dài. Người đến sau cần hiểu công trình thay đổi ra sao, thông tin nào đáng tin, bộ phận nào nguyên gốc, bộ phận nào được thay thế và phương án phục hồi nào có cơ sở. BIM có thể đóng góp quan trọng, nhưng phải nằm trong hệ thống dữ liệu có cấu trúc, định danh bền vững, tiêu chuẩn mở, nguồn gốc, kiểm chứng, lưu trữ dài hạn và trách nhiệm con người.

Một công trình có thể được xây dựng trong nhiều năm, tồn tại qua nhiều thế kỷ và bị phá hủy chỉ trong vài giờ. Không có hệ thống dữ liệu nào bảo đảm mọi giá trị đã mất đều được phục hồi. Nhưng nếu tri thức được bảo tồn có hệ thống, thế hệ tương lai sẽ có thêm cơ sở để hiểu quá khứ và khôi phục những giá trị còn có thể phục hồi. Sứ mệnh dài hạn của BIM không nên chỉ dừng ở giúp xây dựng tốt hơn, mà còn hướng đến giúp hiểu, quản lý, bảo tồn và phục hồi công trình tốt hơn qua nhiều thế hệ. Mô tả những gì cần biết. Mô hình hóa những gì cần thấy. Kiểm chứng những gì cần tin cậy. Và bảo tồn những gì thế hệ tương lai cần để tái sinh công trình.❖

PGS.TS.KTS HOÀNG MẠNH NGUYÊN:

Chuyển dịch từ tư duy **"công trình xanh"** sang **"chuỗi giá trị xây dựng xanh"**



NGUYÊN HẠNH



THU THẢO (thực hiện)

Phát triển vật liệu xanh, công trình xanh, đến đô thị xanh bền vững vẫn là một câu chuyện luôn mới dù chúng ta đã có những kết quả nhất định. Thực tiễn đang đặt ra những câu hỏi lớn trong chính sách phát triển vật liệu xây dựng theo hướng xanh, tuần hoàn và phát thải thấp ở Việt Nam. Và đây cũng là câu chuyện về cuộc chuyển mình của ngành Xây dựng hướng tới những công trình xanh, đô thị xanh bền vững mà BTV Tạp chí Xây dựng cùng PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên - Chủ tịch Viện Khoa học Công nghệ Đô thị xanh, bàn tới.

TIẾN TỚI "VÒNG ĐỜI XANH CỦA VẬT LIỆU"

Thưa PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên, rất cảm ơn ông đã trở lại cùng Tạp chí Xây dựng với câu chuyện về vật liệu xanh, công trình xanh. Có một điều khá thú vị là một công trình được gọi là "xanh" không nhất thiết phải sử dụng thật nhiều vật liệu xanh. Theo ông, điều gì mới thực sự quyết định tính bền vững của một công trình?

- Theo tôi, đây là một điểm rất quan trọng khi nói về công trình xanh: xanh không nằm ở việc công trình sử dụng bao nhiêu "vật liệu xanh", mà nằm ở cách toàn bộ công trình được thiết kế và vận hành hiệu quả như thế nào.

Tính bền vững trước hết được quyết định bởi tư duy thiết kế tổng thể, từ lựa chọn địa điểm, định hướng và hình khối công trình, tổ chức không gian, thông gió và chiếu sáng tự nhiên, che nắng, lựa chọn vật liệu, đến hệ thống kỹ thuật và khả năng vận hành, bảo trì. Một giải pháp kiến trúc tốt có thể giảm nhu cầu năng lượng ngay từ đầu, thay vì phải dùng nhiều thiết bị và vật liệu công nghệ cao để bù đắp cho một thiết kế chưa phù hợp.

Đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới của Việt Nam, tôi cho rằng thiết kế thụ động cần được đặt ở vị trí nền tảng. Tận dụng hướng gió, ánh sáng tự nhiên, bóng râm, cây xanh, mặt nước, khoảng đệm và tổ chức không gian hợp lý có thể cải thiện tiện nghi nhiệt và chất lượng môi trường trong nhà, đồng thời giảm đáng kể nhu cầu làm mát và chiếu sáng nhân tạo.

Vật liệu xanh, vì thế, là một mắt xích quan trọng, nhưng không phải toàn bộ câu chuyện. Một vật liệu có hàm lượng tái chế cao sẽ không tạo nên một công trình bền vững nếu công trình đó được đặt sai hướng, quá phụ thuộc vào điều hòa, chiếu sáng nhân tạo hoặc tiêu tốn nhiều tài nguyên trong quá trình vận hành.

Tôi thường nhìn nhận công trình xanh theo một chuỗi: "đúng địa điểm - đúng khí hậu - đúng thiết kế - đúng công nghệ - đúng vật liệu - và đúng cách vận hành". Trong đó, kiến trúc sư có vai trò đặc biệt ở khâu đầu tiên: đưa các mục tiêu môi trường và năng lượng trở thành những quyết định thiết kế ngay từ khi hình thành ý tưởng, thay vì coi yếu tố xanh như một lớp bổ sung sau khi công trình đã được thiết kế.

Nói một cách ngắn gọn: vật liệu xanh làm cho công trình "xanh hơn", nhưng một thiết kế tốt mới có thể làm cho công trình "xanh ngay từ bản chất".

Thưa ông, nhiều năm nghiên cứu về công trình xanh, kiến trúc nhiệt đới và phát triển đô thị bền vững, ông nhìn nhận thế nào về việc Nghị định 209/2026/NĐ-CP mới đây (có hiệu lực từ ngày 01/7/2026) dành sự quan tâm rõ hơn cho vật liệu xanh, vật liệu tái chế và các loại vật liệu thân thiện với môi trường?

- Tôi cho rằng đây là một bước chuyển đáng chú ý trong tư duy quản lý vật liệu xây dựng ở Việt Nam, bởi Nghị định 209/2026/NĐ-CP không chỉ đề cập đến vật liệu xanh, vật liệu tái chế ở góc độ khuyến khích, mà đã đặt chúng trong một khung chính sách phát triển vật liệu xây dựng theo hướng xanh, tuần hoàn và phát thải thấp.



Ảnh: NGUYỄN HÀ HIỆP

> ***"Xanh" phải gắn với địa phương và điều kiện khí hậu cụ thể. Việt Nam trải dài theo nhiều vùng khí hậu, từ Bắc vào Nam có sự khác biệt rõ về nhiệt độ, độ ẩm, bức xạ mặt trời, mưa và chế độ gió. Vì vậy, không nên có một công thức vật liệu xanh giống nhau cho mọi nơi".***
> *PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên*

Điểm tôi đánh giá cao là Nghị định đã mở rộng cách tiếp cận từ "sản phẩm vật liệu" sang toàn bộ vòng đời của vật liệu. Vật liệu xanh được nhìn nhận trên các khía cạnh từ khai thác nguyên liệu, sản xuất, vận chuyển, sử dụng đến thu hồi và xử lý; đồng thời gắn với tiết kiệm năng lượng, tài nguyên và giảm phát thải khí nhà kính. Vật liệu tái chế cũng được xác định rõ nguồn đầu vào có thể đến từ chất thải, phế thải, phụ phẩm, vật liệu sau sử dụng hoặc vật liệu thu hồi từ phá dỡ công trình.

Đặc biệt, từ ngày 01/7/2027, trong quá trình lập, thẩm định, phê duyệt dự án, thiết kế, quyết định đầu tư và đấu thầu, các chủ thể liên quan sẽ ưu tiên sử dụng vật liệu mới, tái chế, xanh, nhẹ, thông minh và thân thiện môi trường, trên cơ sở phù hợp với yêu cầu kỹ thuật, hiệu quả kinh tế - kỹ thuật, chi phí vòng đời và yêu cầu bảo vệ môi trường.

Theo tôi, điều này có ý nghĩa lớn đối với kiến trúc xanh và công trình xanh. Bởi một công trình muốn thực sự "xanh" không thể chỉ tập trung vào thiết kế, năng lượng vận hành hay cảnh quan mà phải quan tâm ngay từ nguồn nguyên liệu và vật liệu cấu thành công trình. Đây chính là sự chuyển dịch từ tư duy "công trình xanh" sang "chuỗi giá trị xây dựng xanh".

Tuy nhiên, để chính sách đi vào thực tế, vấn đề quan trọng tiếp theo là phải cụ thể hóa các tiêu chí, tiêu chuẩn, phương pháp đánh giá và cơ chế chứng nhận, đồng thời hình thành thị trường minh bạch cho vật liệu xanh và vật liệu tái chế. Khi đó, "xanh" sẽ không chỉ là một khẩu hiệu hay lợi thế marketing, mà trở thành một tiêu chí có thể đo lường, kiểm chứng và tạo ra giá trị kinh tế thực sự cho ngành Xây dựng. Ở cấp độ rộng hơn, theo tôi cũng rất cần sớm xây dựng và ban hành một bộ tiêu chí, tiêu chuẩn và phương pháp đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam, bao quát từ khí hậu, tài nguyên, công nghệ, kinh tế đến đặc điểm sử dụng công trình. Bộ tiêu chí này có thể được ưu tiên áp dụng và thí điểm trong các công trình sử dụng vốn ngân sách nhà nước, đặc biệt là những công trình quan trọng, đặc thù hoặc có yêu cầu về bảo mật và an ninh quốc gia. Đây vừa là công cụ để lượng hóa mục tiêu xanh, vừa tạo cơ sở thống nhất cho việc lập dự án, thiết kế, thẩm định, lựa chọn giải pháp và đánh giá hiệu quả công trình.

Nhắc đến vật liệu xanh, nhiều người đang hiểu theo những cách khá khác nhau. Theo ông, thế nào mới thực sự là một vật liệu xanh? Chẳng hạn, một sản phẩm có sử dụng nguyên liệu tái chế hoặc ít phát thải thì đã có thể gọi là "xanh", hay chúng ta còn cần nhìn rộng hơn?

- Theo tôi, không nên đồng nhất "có thành phần tái chế" hay "phát thải thấp" với "vật liệu xanh". Một sản phẩm có thể sử dụng nguyên liệu tái chế nhưng nếu quá trình sản xuất tiêu tốn nhiều năng lượng, vận chuyển xa, phát sinh chất độc hại hoặc khó tái sử dụng khi hết vòng đời thì chưa thể chỉ dựa vào một tiêu chí để khẳng định là "xanh".

Nghị định 209/2026/NĐ-CP cũng đang tiếp cận theo hướng rộng hơn: quản lý vật liệu xây dựng xuyên suốt chuỗi từ nguyên liệu, sản xuất, lưu thông, sử dụng đến thu hồi, tái chế và xử lý chất thải, hướng tới mô hình xanh, tuần hoàn và phát thải thấp.

> ***Nhà nước cần sớm hoàn thiện một hệ thống tiêu chí và tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam, trong đó có thể lấy một số công trình sử dụng vốn ngân sách, nhất là công trình quan trọng và đặc thù, làm những trường hợp tiên phong để kiểm chứng và hoàn thiện hệ thống trong thực tế".***
>
> *PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên*

Vì vậy, theo tôi, một vật liệu thực sự xanh cần được nhìn nhận trên toàn bộ vòng đời, ít nhất ở 5 khía cạnh: nguồn gốc nguyên liệu; năng lượng và phát thải trong sản xuất; mức độ an toàn đối với sức khỏe và môi trường; hiệu quả trong quá trình sử dụng; và khả năng tái sử dụng, tái chế hoặc xử lý sau khi hết vòng đời.

Nói cách khác, "xanh" không nằm ở một thành phần riêng lẻ mà nằm ở tổng thể hiệu quả môi trường của vật liệu trong suốt vòng đời của nó. Đây cũng là lý do cần có các tiêu chí, phương pháp đánh giá và dữ liệu minh bạch để người thiết kế, chủ đầu tư và người sử dụng có thể phân biệt giữa một vật liệu thực sự xanh với một sản phẩm chỉ mang "nhãn xanh". Bộ Xây dựng hiện cũng định hướng phát triển vật liệu theo chuỗi giá trị và kinh tế tuần hoàn.

Tôi cho rằng đây là điểm rất quan trọng: từ "vật liệu xanh" cần tiến tới "vòng đời xanh của vật liệu". Khi đó, việc lựa chọn vật liệu không chỉ dựa vào giá thành hay tính năng kỹ thuật, mà phải cân nhắc đồng thời về carbon, tài nguyên, năng lượng, sức khỏe con người và khả năng tuần hoàn. Đây mới là nền tảng để vật liệu thực sự đóng góp vào mục tiêu công trình xanh và phát triển bền vững.

Theo ông, điều gì để những chính sách này thực sự đi vào cuộc sống và giúp doanh nghiệp mạnh dạn đầu tư hơn?

- Theo tôi, Nghị định 209/2026/NĐ-CP đã tạo được một khung chính sách quan trọng, nhưng để chính sách thực sự trở thành động lực đầu tư thì cần đi thêm một bước: biến "khuyến khích, ưu đãi" thành những lợi ích mà doanh nghiệp có thể nhìn thấy, tính toán và tiếp cận được. Nghị định đã xác định rõ cơ chế khuyến khích, ưu đãi đối với nghiên cứu, đầu tư phát triển và sử dụng vật liệu mới, xanh, tái chế, phát thải thấp…

Theo tôi, có 6 việc cần đặc biệt quan tâm:

Một là, cụ thể hóa ưu đãi thành cơ chế tài chính thực chất. Doanh nghiệp cần biết rất rõ: đầu tư vào công nghệ xanh thì được hỗ trợ gì, tiếp cận nguồn vốn nào, ưu đãi thuế ra sao, trong thời gian bao lâu và điều kiện để được hưởng là gì. Chính sách càng cụ thể và ổn định, doanh nghiệp càng có cơ sở để tính toán đầu tư dài hạn.

Hai là, tạo thị trường đầu ra cho vật liệu xanh. Đây có lẽ là điểm quan trọng nhất. Nếu chỉ hỗ trợ phía sản xuất nhưng không tạo được nhu cầu từ phía công trình thì doanh nghiệp vẫn khó mở rộng quy mô. Cần có cơ chế khuyến khích hoặc tiêu chí phù hợp trong thiết kế, đấu thầu, đầu tư công và các dự án phát triển đô thị, để vật liệu xanh có "đầu ra" thực tế.

Ba là, nhanh chóng hoàn thiện hệ thống tiêu chuẩn và phương pháp đánh giá. Doanh nghiệp cần có một "ngôn ngữ chung" để chứng minh sản phẩm của mình xanh đến đâu: hàm lượng tái chế, carbon hàm chứa, tiêu thụ năng lượng, khả năng tái sử dụng, độ bền, mức độ an toàn… Bộ Xây dựng cũng xác định việc hoàn thiện tiêu chuẩn, quy chuẩn và công cụ quản lý là một phần quan trọng của quá trình chuyển đổi ngành vật liệu theo hướng xanh và tuần hoàn.

Bốn là, tăng liên kết giữa nghiên cứu - doanh nghiệp - công trình. Một sản phẩm nghiên cứu chỉ thực sự có giá trị khi được thử nghiệm trong điều kiện thực tế, hoàn thiện công nghệ, chuẩn hóa chất lượng và thương mại hóa. Hiện nay, chính sự liên kết giữa nghiên cứu ứng dụng và sản xuất kinh doanh vẫn được nhận diện là một khoảng cách cần khắc phục trong phát triển công nghiệp vật liệu.

Năm là, có những công trình tiên phong để tạo niềm tin cho thị trường. Nhà nước có thể đóng vai trò "khách hàng đầu tiên" thông qua một số dự án công trình xanh, công trình tiết kiệm năng lượng, công trình sử dụng vật liệu tái chế… Khi một công nghệ được kiểm chứng về kỹ thuật, hiệu quả kinh tế và môi trường trong công trình thực tế, doanh nghiệp sẽ dễ dàng thuyết phục thị trường hơn.

Sáu là, sớm xây dựng và ban hành bộ tiêu chí, tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam. Hệ thống này cần có khả năng sử dụng xuyên suốt từ giai đoạn lập dự án, thiết kế, thẩm định, đầu tư, đấu thầu đến đánh giá hiệu quả sau khi công trình đưa vào sử dụng. Tôi cho rằng nên lựa chọn một số công trình sử dụng vốn ngân sách nhà nước, đặc biệt là công trình quan trọng, đặc thù để thí điểm, qua đó hoàn thiện tiêu chí bằng dữ liệu thực tế. Đối với những công trình có yêu cầu về bảo mật và an ninh quốc gia, một hệ thống đánh giá phù hợp của Việt Nam cũng giúp kiểm soát tốt hơn dữ liệu, phương pháp đánh giá và yêu cầu bảo mật, trong khi vẫn đảm bảo các mục tiêu về tiết kiệm năng lượng, tài nguyên và môi trường. Khi đó có thể hình thành một vòng kết nối: "tiêu chuẩn tạo niềm tin - đầu tư công tạo thị trường - công trình thực tế tạo dữ liệu - dữ liệu tiếp tục hoàn thiện tiêu chuẩn".

Doanh nghiệp không chỉ cần được "khuyến khích", mà cần có một môi trường đầu tư đủ ổn định để họ dám bỏ vốn dài hạn. Đặc biệt, Kết luận 83-KL/TW ngày 08/8/2026 của Bộ Chính trị về phát triển công nghiệp vật liệu Việt Nam cũng nhấn mạnh yêu cầu hoàn thiện pháp luật, xây dựng hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn đồng bộ và tạo môi trường thuận lợi, an toàn, minh bạch cho đầu tư kinh doanh trong lĩnh vực vật liệu.

Nói ngắn gọn, tôi nghĩ, chính sách cần tạo thành một chuỗi hoàn chỉnh: "nghiên cứu có kinh phí - doanh nghiệp có động lực - sản phẩm có tiêu chuẩn - công trình có nhu cầu - thị trường có đầu ra". Khi cả chuỗi này được kết nối, vật liệu xanh mới có thể chuyển từ một lĩnh vực được khuyến khích thành một ngành sản xuất có sức cạnh tranh thực sự.

ĐANG THIẾU MỘT THỊ TRƯỜNG VLXD XANH ĐỦ LỚN VÀ MINH BẠCH

Ông nhìn nhận thị trường vật liệu xanh hiện nay như thế nào?

- Theo tôi, thị trường vật liệu xanh ở Việt Nam đã vượt qua giai đoạn chỉ dừng ở nghiên cứu, thử nghiệm và đang bước vào giai đoạn thương mại hóa rõ nét hơn. Chúng ta đã có nhiều sản phẩm có khả năng đưa vào công trình thực tế như vật liệu xây không nung, bê tông khí chưng áp, tấm tường nhẹ, vật liệu sử dụng tro xỉ, kính tiết kiệm năng lượng, vật liệu tái chế, tre, gỗ rừng trồng… Một số công nghệ sản xuất trong nước cũng đã từng bước tiệm cận trình độ tiên tiến.

Nhìn từ thực tế triển khai, theo ông điều gì đang khiến vật liệu xanh chưa thể phổ biến nhanh hơn ở Việt Nam?

- Không có một nguyên nhân đơn lẻ, mà là sự cộng hưởng của nhiều yếu tố. Trong đó, tôi cho rằng vấn đề lớn nhất hiện nay không hẳn là chúng ta chưa có sản phẩm, mà là thị trường vật liệu xanh chưa đủ lớn, đủ minh bạch và đủ ổn định để tạo động lực cho cả sản xuất và sử dụng.

Có thể nhìn thấy khoảng cách này qua một số nhóm vấn đề.

Thứ nhất là giá thành và quy mô sản xuất. Nhiều công nghệ xanh cần vốn đầu tư ban đầu lớn, trong khi sản lượng chưa đủ lớn để tạo lợi thế về giá. Nếu chỉ so sánh đơn giá vật liệu tại thời điểm mua, vật liệu xanh đôi khi khó cạnh tranh với vật liệu truyền thống. Đây cũng là một trong những thách thức được ngành Xây dựng và doanh nghiệp phản ánh.

Thứ hai là tiêu chuẩn, quy chuẩn và cơ chế đánh giá. Một sản phẩm muốn được sử dụng rộng rãi phải chứng minh được tính năng kỹ thuật, độ bền, an toàn và hiệu quả môi trường. Nhưng với nhiều loại vật liệu mới, tái chế hoặc sử dụng chất thải, hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật vẫn đang tiếp tục được hoàn thiện. Chính Bộ Xây dựng cũng xác định việc hoàn thiện hành lang pháp lý, tiêu chuẩn và quy chuẩn là một nhiệm vụ quan trọng trong giai đoạn hiện nay.

Thứ ba là sự ổn định của nguồn cung và chất lượng. Một công trình không thể chỉ thử nghiệm một sản phẩm tốt ở quy mô nhỏ; chủ đầu tư cần biết sản phẩm có được cung cấp ổn định trong nhiều năm hay không, chất lượng giữa các lô có đồng đều không, có hệ thống bảo hành và hỗ trợ kỹ thuật hay không. Đây là yêu cầu đặc biệt quan trọng khi đưa vật liệu mới từ nghiên cứu vào sản xuất đại trà.

Thứ tư là phía cầu của thị trường chưa đủ mạnh. Nếu chủ đầu tư, tư vấn và nhà thầu vẫn chủ yếu lựa chọn theo tiêu chí "giá thấp, quen thuộc và dễ thi công", thì vật liệu xanh sẽ khó tạo được thị trường đủ lớn. Chính quá trình xây dựng Nghị định 209/2026/NĐ-CP cũng cho thấy một vấn đề đáng chú ý: nếu chỉ dừng ở mức "khuyến khích, ưu tiên" mà không tạo được nhu cầu thực tế, doanh nghiệp sẽ khó mạnh dạn đầu tư mở rộng sản xuất vật liệu xanh.

Vì vậy, tôi cho rằng điểm nghẽn hiện nay nằm ở cả cung và cầu, nhưng quan trọng nhất là sự kết nối giữa hai phía. Chúng ta đã có những sản phẩm và công nghệ có tiềm năng; đồng thời khung chính sách mới cũng đang tạo nền tảng để hình thành thị trường. Nghị định 209/2026/NĐ-CP đặt vấn đề quản lý vật liệu theo toàn bộ chuỗi từ nguyên liệu, sản xuất, lưu thông, sử dụng đến thu hồi và tái chế, theo hướng xanh, tuần hoàn và phát thải thấp.

Theo tôi, để thị trường đi nhanh hơn cần đồng thời "chuẩn hóa - chứng minh - tạo cầu". Chuẩn hóa bằng tiêu chuẩn và quy chuẩn; chứng minh bằng dữ liệu về chất lượng, carbon và vòng đời; và tạo cầu thông qua thiết kế, đấu thầu, đầu tư công, các công trình tiên phong và cơ chế khuyến khích phù hợp.

Khi người mua nhìn thấy rõ giá trị, người thiết kế có cơ sở để lựa chọn, doanh nghiệp có thị trường đủ lớn để đầu tư và cơ quan quản lý có công cụ đánh giá minh bạch, vật liệu xanh sẽ không còn là một lựa chọn "khác biệt", mà sẽ dần trở thành một lựa chọn bình thường của thị trường xây dựng.

Chúng ta đã có những sản phẩm, công nghệ đủ sức cạnh tranh để đưa vào công trình thực tế chưa, hay vẫn còn một khoảng cách nhất định giữa nghiên cứu và ứng dụng?

- Đúng vậy, vẫn còn khoảng cách giữa nghiên cứu và ứng dụng, và theo tôi, đây mới là vấn đề cần quan tâm trong giai đoạn tới. Không phải chúng ta thiếu hoàn toàn sản phẩm, mà còn thiếu một hệ sinh thái để sản phẩm xanh có thể đi từ phòng thí nghiệm đến thị trường với quy mô lớn. Hiện vẫn tồn tại những rào cản về tiêu chuẩn kỹ thuật, giá thành, quy mô sản xuất, tính ổn định của chất lượng, dữ liệu về phát thải và truy xuất nguồn gốc, cũng như tâm lý còn thận trọng của chủ đầu tư và tư vấn. Bộ Xây dựng cũng ghi nhận tỷ lệ vật liệu xanh, vật liệu tái chế trong cơ cấu sử dụng vẫn còn thấp so với yêu cầu phát triển bền vững.

Tôi cho rằng cần chuyển trọng tâm từ "có sản phẩm xanh" sang "tạo được thị trường cho sản phẩm xanh". Muốn vậy phải đồng thời làm tốt ba việc: chuẩn hóa - chứng minh - tạo cầu. Chuẩn hóa bằng hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn và phương pháp đánh giá rõ ràng; chứng minh bằng dữ liệu về vòng đời, carbon, năng lượng và sức khỏe; và tạo cầu thông qua thiết kế, đấu thầu, đầu tư công cũng như các cơ chế khuyến khích phù hợp. Những định hướng chính sách gần đây cũng đang đi theo hướng tăng cường sử dụng vật liệu xanh, tái chế và thân thiện môi trường trong các dự án. Ở đây, "chuẩn hóa" không chỉ dừng ở tiêu chuẩn đối với từng loại vật liệu, mà cần được mở rộng thành một hệ thống tiêu chí và tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam.

Một vấn đề mà các chủ đầu tư thường quan tâm là vật liệu xanh có thể khiến chi phí ban đầu tăng lên. Chúng ta nên nhìn bài toán chi phí này như thế nào để có một cách đầu tư hợp lý hơn?

- Theo tôi, không nên chỉ nhìn chi phí vật liệu xanh ở thời điểm mua và xây dựng, mà cần nhìn theo chi phí vòng đời của công trình. Một vật liệu hay giải pháp có chi phí đầu tư ban đầu cao hơn chưa chắc đã đắt hơn nếu trong suốt quá trình sử dụng, nó giúp giảm tiêu thụ năng lượng, chi phí vận hành, bảo trì, thay thế và xử lý cuối vòng đời.

Quan trọng hơn, không phải cứ công trình xanh là phải đầu tư thêm thật nhiều tiền. Nhiều khi giải pháp hiệu quả nhất

> ***Tôi không cho rằng Việt Nam đang thiếu vật liệu xanh; chúng ta đang thiếu một thị trường xanh đủ lớn và đủ minh bạch để kéo công nghệ xanh phát triển".***
>
> *PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên*

lại đến từ quyết định thiết kế ngay từ đầu: lựa chọn hướng công trình, tổ chức mặt bằng, che nắng, thông gió và chiếu sáng tự nhiên, thiết kế lớp vỏ phù hợp với khí hậu… Những giải pháp này đôi khi có chi phí bổ sung không lớn nhưng tạo hiệu quả lâu dài.

Vì vậy, chủ đầu tư nên chuyển từ tư duy "chi phí đầu tư ban đầu thấp nhất" sang "giá trị vòng đời tốt nhất". Khi đánh giá một giải pháp, cần đặt lên bàn cân đồng thời chi phí đầu tư, năng lượng tiêu thụ, chi phí vận hành - bảo trì, tuổi thọ, khả năng tái sử dụng và tác động môi trường.

Đặc biệt, nếu tính thêm những giá trị khó nhìn thấy ngay như tiện nghi và sức khỏe người sử dụng, chất lượng môi trường trong nhà, khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và giá trị tài sản trong dài hạn, bài toán kinh tế của công trình xanh sẽ đầy đủ hơn rất nhiều.

Tôi cho rằng đầu tư xanh không nên được hiểu là "chi thêm tiền để mua một sản phẩm xanh", mà là "đầu tư thông minh hơn ngay từ đầu để giảm tổng chi phí và tăng giá trị công trình trong suốt vòng đời". Đây cũng là cơ sở để vật liệu xanh và các giải pháp thiết kế bền vững chuyển từ một lựa chọn mang tính khuyến khích thành một quyết định đầu tư có cơ sở kinh tế và môi trường rõ ràng.

KHÔNG NÊN CÓ MỘT CÔNG THỨC VẬT LIỆU XANH GIỐNG NHAU

Việt Nam mình có khí hậu khá đặc thù, lại có sự khác biệt lớn giữa các vùng. Theo ông, khi phát triển vật liệu xanh, chúng ta có nên chú ý nhiều hơn đến khí hậu, vật liệu bản địa và nguồn tài nguyên sẵn có của từng địa phương?

- Đây là một trong những nguyên tắc rất quan trọng khi phát triển vật liệu xanh ở Việt Nam: "xanh" phải gắn với địa phương và điều kiện khí hậu cụ thể. Việt Nam trải dài theo nhiều vùng khí hậu, từ Bắc vào Nam có sự khác biệt rõ về nhiệt độ, độ ẩm, bức xạ mặt trời, mưa và chế độ gió. Vì vậy, không nên có một công thức vật liệu xanh giống nhau cho mọi nơi.

Trước hết, cần quan tâm đến nguồn tài nguyên và vật liệu bản địa. Đất, đá, tre, gỗ, phụ phẩm nông nghiệp hay các nguồn phế thải công nghiệp của mỗi vùng đều có thể trở thành nguồn nguyên liệu cho vật liệu xây dựng nếu được khai thác hợp lý. Sử dụng nguồn nguyên liệu gần nơi xây dựng còn có thể giảm quãng đường vận chuyển, chi phí logistics và phát thải carbon.

Thứ hai, vật liệu cần phù hợp với khí hậu và giải pháp kiến trúc của từng vùng. Ví dụ, ở khí hậu nóng ẩm, vật liệu và cấu tạo bao che cần hỗ trợ kiểm soát bức xạ mặt trời, nhiệt và ẩm; trong khi ở miền Bắc, khả năng thích ứng với cả mùa nóng và mùa lạnh lại cần được quan tâm. Vì vậy, đánh giá vật liệu không thể tách rời khỏi khí hậu, công trình và cách sử dụng thực tế.

Đây là cơ hội để kết hợp tri thức truyền thống với công nghệ hiện đại. Việt Nam có một kho kinh nghiệm rất phong phú về tre, gỗ, đất, đá, gạch, ngói và các giải pháp thích ứng khí hậu trong kiến trúc dân gian. Nếu được nghiên cứu, chuẩn hóa và kiểm chứng bằng các công cụ hiện đại như LCA, mô phỏng năng lượng và đánh giá hiệu quả môi trường, những vật liệu bản địa hoàn toàn có thể trở thành một phần của hệ sinh thái vật liệu xanh đương đại.

Nói cách khác, vật liệu xanh không nhất thiết phải là vật liệu công nghệ cao hay nhập khẩu. Một vật liệu bản địa, được khai thác có trách nhiệm, sản xuất phù hợp, sử dụng hiệu quả và có khả năng quay trở lại chu trình vật chất cũng có thể là một vật liệu rất "xanh".

Tôi cho rằng hướng đi phù hợp với Việt Nam là "địa phương hóa vật liệu xanh" - mỗi vùng phát huy nguồn tài nguyên, tri thức và điều kiện khí hậu của mình, thay vì áp dụng một mô hình vật liệu xanh đồng nhất cho cả nước.

Chúng ta đã có những văn bản pháp lý khuyến khích sử dụng chất thải đáp ứng yêu cầu làm nguyên liệu sản xuất vật liệu xây dựng. Liệu có thể xem đây như một nguồn tài nguyên mới hay không? Và hiện nay, những loại chất thải nào có nhiều tiềm năng nhất để biến thành vật liệu xây dựng?

- Có. Tôi cho rằng hoàn toàn có thể nhìn chất thải như một "nguồn tài nguyên thứ cấp" cho ngành vật liệu xây dựng. Đây chính là sự chuyển đổi rất quan trọng từ tư duy "xử lý chất thải" sang "khai thác tài nguyên từ chất thải", phù hợp với kinh tế tuần hoàn. Nghị định 209/2026/NĐ-CP, như chúng ta vừa nhắc đến, cũng đã tạo cơ sở pháp lý rõ hơn cho việc sử dụng chất thải trong sản xuất vật liệu xây dựng, đồng thời yêu cầu chất thải phải được phân loại, đánh giá chất lượng và mức độ an toàn, đáp ứng tiêu chuẩn, quy chuẩn và yêu cầu môi trường.

Theo tôi, ở Việt Nam hiện có một số nhóm nguồn thải rất đáng quan tâm:

• Tro, xỉ nhiệt điện và xỉ luyện kim: đây là nguồn có quy mô lớn và đã có thực tế sử dụng trong xi măng, bê tông và một số loại vật liệu khác. Bộ Xây dựng cho biết hiện khoảng 20 triệu tấn tro, xỉ nhiệt điện và hơn 2 triệu tấn xỉ luyện kim được tái sử dụng mỗi năm.

• Chất thải xây dựng và phá dỡ: có tiềm năng rất lớn để nghiền, phân loại và tái sử dụng làm cốt liệu tái chế, vật liệu san lấp hoặc các sản phẩm xây dựng phù hợp. Riêng lượng chất thải xây dựng được Bộ Xây dựng dẫn khoảng 9,6 triệu tấn/năm, nhưng phần lớn tiềm năng này vẫn chưa được khai thác hiệu quả.

• Đất, đá thải từ khai thác và chế biến khoáng sản: đây là nhóm đặc biệt đáng chú ý vì có thể thay thế một phần nguồn khoáng sản tự nhiên nếu được xử lý và kiểm soát phù hợp. Nghị định 209/2026/NĐ-CP đã quy định theo hướng khuyến khích tận dụng nhóm chất thải này.



Ảnh: NGUYỄN HÀ HIỆP

PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên, sinh năm 1971; quê quán: Thanh Trì, Hà Nội; tốt nghiệp KTS Trường ĐH Kiến trúc Hà Nội năm 1992, TS Kiến trúc năm 2002, thực tập sau TS tại Technische Universität Berlin (CHLB Đức) về bảo tồn đô thị và thiết kế tiết kiệm năng lượng năm 2004.

Năm 2008 ông sáng lập VIEALIFE nhóm KTS tư vấn thiết kế thích ứng khí hậu và tiết kiệm năng lượng. Năm 2011 sáng lập nhóm (tiền thân của trung tâm) tư vấn tiết kiệm năng lượng tại Viện Kiến trúc Nhiệt đới. Năm 2016 sáng lập Viện Nghiên cứu và Phát triển Đô thị xanh, nay là Viện KHCN Đô thị xanh. Hiện PGS.TS.KTS Hoàng Mạnh Nguyên là Chủ tịch Viện KHCN Đô thị xanh (Hội Môi trường Xây dựng - Tổng hội Xây dựng Việt Nam).

Với gần 30 năm kinh nghiệm trong lĩnh vực thiết kế và phát triển đô thị, ông đã từng là Viện trưởng Viện Kiến trúc nhiệt đới và giảng viên khách mời tại Technische Universität Berlin. Ông cũng là người sáng lập và điều hành VIEALIFE Group và hiện đang là giảng viên tại Trường ĐH Kiến trúc Hà Nội.

• Thạch cao nhân tạo, bùn thải và một số chất thải công nghiệp thông thường: có thể trở thành nguyên liệu thay thế trong sản xuất xi măng và các vật liệu khác khi đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và môi trường. Thực tế ngành xi măng đã sử dụng thạch cao nhân tạo thay thế thạch cao tự nhiên ở quy mô đáng kể.

• Ngoài ra, cao su phế thải, một số phụ phẩm nông nghiệp và các dòng chất thải có thành phần phù hợp cũng có thể được nghiên cứu để tạo ra vật liệu cách âm, cách nhiệt, composite hoặc các sản phẩm có chức năng đặc biệt.

Tuy nhiên, tôi muốn nhấn mạnh một điểm: không phải cứ chất thải là có thể trở thành nguyên liệu xanh. Cần đánh giá rất kỹ thành phần hóa học, nguy cơ ô nhiễm, độ ổn định, khoảng cách vận chuyển, năng lượng cần thiết để xử lý và đặc biệt là khả năng bảo đảm chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Vì vậy, bài toán không chỉ là "tái chế được bao nhiêu chất thải", mà phải là "biến chất thải nào thành sản phẩm có giá trị cao nhất, an toàn nhất và có hiệu quả môi trường thực sự".

Nếu làm tốt, đây sẽ là một hướng đi rất lớn cho Việt Nam: giảm khai thác tài nguyên nguyên sinh, giảm áp lực bãi chôn lấp, giảm phát thải và đồng thời tạo ra nguồn nguyên liệu mới cho ngành Xây dựng. Nói cách khác, chất thải hôm nay hoàn toàn có thể trở thành "mỏ tài nguyên của ngày mai".

Vậy, chúng ta cần làm gì để vật liệu xanh không chỉ là một xu hướng mới, mà thực sự trở thành một lựa chọn lâu dài của ngành Xây dựng, thưa ông?

- Đừng nhìn vật liệu xanh như một "xu hướng", mà hãy nhìn nó như một sự thay đổi tất yếu trong cách chúng ta làm ra và sử dụng công trình.

Với kiến trúc sư, hãy đưa tư duy xanh vào ngay từ những quyết định đầu tiên của thiết kế, đặc biệt là khai thác khí hậu, thông gió và chiếu sáng tự nhiên, che nắng, tiết kiệm năng lượng và lựa chọn vật liệu phù hợp. Một công trình xanh tốt không nhất thiết phải có thật nhiều công nghệ hay vật liệu đắt tiền; quan trọng là giải pháp phù hợp với địa điểm, khí hậu và nhu cầu sử dụng.

Với doanh nghiệp và chủ đầu tư, cần nhìn xa hơn chi phí đầu tư ban đầu. Hãy đánh giá vật liệu và giải pháp trên toàn bộ vòng đời công trình: từ tài nguyên, năng lượng, carbon, chi phí vận hành đến sức khỏe người sử dụng và khả năng tái sử dụng, tái chế. Khi giá trị dài hạn được tính đầy đủ, nhiều lựa chọn xanh sẽ trở nên hợp lý hơn về kinh tế.

Và với toàn ngành Xây dựng, tôi cho rằng, cần cùng nhau hình thành một thị trường trong đó "xanh" phải được đo lường, kiểm chứng và tạo ra giá trị thực, chứ không chỉ là một nhãn hiệu. Nhà nước hoàn thiện tiêu chuẩn và cơ chế khuyến khích; nhà khoa học cung cấp cơ sở dữ liệu và công cụ đánh giá; doanh nghiệp đầu tư công nghệ và nâng cao chất lượng; kiến trúc sư và tư vấn tạo ra nhu cầu thông qua thiết kế; còn chủ đầu tư tạo ra những công trình tiên phong để kiểm chứng trong thực tế. Nhà nước cần sớm hoàn thiện một hệ thống tiêu chí và tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam, trong đó có thể lấy một số công trình sử dụng vốn ngân sách, nhất là công trình quan trọng và đặc thù, làm những trường hợp tiên phong để kiểm chứng và hoàn thiện hệ thống trong thực tế.

Cuối cùng, tôi nghĩ chúng ta không nên hỏi "vật liệu xanh có đắt hơn không?", mà nên hỏi "vật liệu này tạo ra giá trị gì cho công trình trong 30, 50 hay 70 năm?". Khi cách đặt câu hỏi thay đổi, cách chúng ta thiết kế, đầu tư và xây dựng cũng sẽ thay đổi.

Vật liệu xanh chỉ thực sự trở thành tương lai khi nó không còn được xem là một lựa chọn đặc biệt, mà trở thành lựa chọn tự nhiên của một ngành Xây dựng có trách nhiệm với con người, tài nguyên và các thế hệ mai sau.

Trân trọng cảm ơn ông!

Phép thử lớn mang tên Mường Thanh!



NGUYỄN HOÀNG LINH

Trong lịch sử quản lý trật tự xây dựng đô thị của nước nhà có lẽ chưa từng ghi nhận một sự kiện sai phạm nào nghiêm trọng đến như vậy: Chỉ một doanh nghiệp tại một địa phương có đến 12 dự án BĐS sai phạm tới 18.184 căn hộ, kéo dài trong hơn 10 năm, trải qua 5 đời Chủ tịch UBND thành phố mà vẫn chưa được xử lý. Vậy những bài học gì có thể rút ra từ vụ việc này?

CUỘC GIẰNG CO TRÁCH NHIỆM

Ngày 28/10/2026 có thể coi là phiên họp lịch sử của HĐND TP Hà Nội khi thông qua nghị quyết quy định cơ chế, chính sách đặc thù và biện pháp khắc phục hậu quả để giải quyết tồn tại vi phạm về đất đai, trật tự xây dựng tại 12 dự án liên quan đến Tập đoàn Mường Thanh. Nghị quyết được ban hành trên cơ sở khoản 2 Điều 8 và khoản 4 Điều 14 Luật Thủ đô số 02/2026/QH16.

Nói là lịch sử bởi lẽ trong lĩnh vực quản lý trật tự xây dựng đô thị của nước nhà chưa từng ghi nhận một sự kiện sai phạm nào nghiêm trọng đến như vậy: Chỉ một doanh nghiệp trên địa bàn Thủ đô đã có đến 12 dự án BĐS sai phạm tới 18.184 căn hộ, kéo dài trong hơn 10 năm, trải qua 5 đời Chủ tịch UBND thành phố mà vẫn chưa được xử lý.

Những hành vi vi phạm pháp luật quy mô lớn đã diễn ra tại các tổ hợp CT6 Kiến Hưng, Khu đô thị Xa La, CT5 Tân Triều tại quận Hà Đông; Khu đô thị Đại Thanh tại huyện Thanh Trì; Khu đô thị Kim Văn - Kim Lũ, tổ hợp 12 tòa chung cư HH Linh Đàm, các khối nhà VP3, VP5, VP6 tại quận Hoàng Mai; và Khu đô thị Thanh Hà - Cienco 5. Tại các dự án này, chủ đầu tư đã tự ý điều chỉnh tăng chiều cao công trình từ 25 đến 27 tầng theo phê duyệt ban đầu lên tới 35 đến 41 tầng; nâng hệ số sử dụng đất vượt ngưỡng cho phép nhiều lần; tự ý xây dựng không phép cả một tòa nhà cao tầng như trường hợp tháp CT6C Kiến Hưng; chuyển đổi công năng các tầng thương mại, dịch vụ, tầng kỹ thuật và áp mái thành hàng nghìn căn hộ diện tích nhỏ để bán thương mại; chiếm dụng tầng hầm và hạ tầng đỗ xe công cộng phục vụ mục đích kinh doanh riêng...

Sai phạm nghiêm trọng như thế, diễn ra trong một thời gian dài giữa thanh thiên bạch nhật, dưới sự giám sát của nhiều cấp quản lý trật tự xây dựng đô thị... đã để lại những hậu quả không thể lường hết.

Theo con số thống kê, tổng số căn hộ được phê duyệt ban đầu của 12 dự án là 6.759, nhưng thực tế chủ đầu tư đã xây dựng thành 24.943 căn, chênh lệch 18.184 căn. Thử hỏi, nếu nghiêm khắc xử lý tất cả các căn vi phạm kia, điều gì sẽ xảy ra với khoảng 18 nghìn hộ gia đình khi họ đang sinh sống ổn định cả chục năm về công ăn việc làm, về nhu cầu học hành cho trẻ nhỏ, chữa bệnh cho người già..., nay mọi thứ bị đảo lộn, bơ vơ... mà phần đông trong số đó đều là những hộ có thu nhập không cao và đồng thời là người bị hại!

Chính vì để lại hậu quả quá lớn, diện ảnh hưởng an sinh quá rộng nên trong nhiều năm, chính quyền Hà Nội đã nhiều lần muốn xử lý dứt điểm vụ việc nhưng vẫn không đề ra được phương án thỏa đáng trong suốt 4 nhiệm kỳ Chủ tịch thành phố trước đó!

XỬ LÝ SAI PHẠM TỪ KHI CÒN TRỨNG NƯỚC

Một câu hỏi đặt ra, tại sao một chính quyền dày dạn kinh nghiệm quản lý đô thị như Hà Nội lại để xảy ra vụ việc nghiêm trọng như vậy? Không chỉ trên các phương tiện truyền thông mà tại nhiều hội nghị, nhiều cuộc tọa đàm về giữ gìn kỷ cương trong quản lý trật tự xây dựng đô thị đều dễ dàng nêu

XI MĂNG CẨM PHẢ
Dựng xây cuộc sống
HÂN HẠNH TÀI TRỢ CHUYÊN MỤC

ra được một phương thuốc phòng ngừa hữu hiệu, đó là xử lý sai phạm từ khi còn trứng nước!

Bài học này có hiệu quả rất rõ khi xử lý xây vượt tầng cũng của Tập đoàn Mường Thanh tại Khánh Hòa. Câu chuyện bắt đầu từ ngày 12/9/2014, Chủ tịch UBND tỉnh Khánh Hòa đã ký thỏa thuận cho dự án Mường Thanh Khánh Hòa xây tới 47 tầng và 2 tầng hầm, trên tổng diện tích đất 5.864 m^2. Sở Xây dựng đã căn cứ vào đó để cấp phép.

Đến ngày 17/6/2015, UBND tỉnh Khánh Hòa lại ký văn bản thỏa thuận điều chỉnh cho Mường Thanh Khánh Hòa xây lên đến 48 tầng, với tổng diện tích đất được tăng lên tới 6.895m^2. Trên cơ sở đó, Sở Xây dựng cấp GPXD và phụ lục điều chỉnh GPXD cho Mường Thanh Khánh Hòa với diện tích đất, số tầng theo các công văn thỏa thuận nêu trên.

Một sự việc hy hữu xảy ra, theo quy hoạch chung TP Nha Trang đến năm 2025 đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt điều chỉnh ngày 25/9/2012 thì chiều cao các công trình xây dựng tối đa ở khu vực mà Mường Thanh Khánh Hòa đang xây cao ốc là không quá 40 tầng. Nay UBND tỉnh Khánh Hòa lại cấp phép cho Mường Thanh Khánh Hòa xây lên đến 48 tầng, vậy điều gì sẽ xảy ra?

Đương nhiên với doanh nghiệp vì mục tiêu lợi nhuận, họ sẽ khai thác tối đa những khe hở của pháp luật và lẳng lặng xây vượt qua tầng 40, lên 41 rồi 42 và đến tầng 43...

Khác hẳn với vụ việc ở Hà Nội khi chủ đầu tư đã tự ý điều chỉnh tăng chiều cao công trình từ 25 đến 27 tầng theo phê duyệt ban đầu lên tới 35 đến 41 tầng; nâng hệ số sử dụng đất vượt ngưỡng cho phép nhiều lần; tự ý xây dựng không phép cả một tòa nhà cao tầng…, còn dự án Mường Thanh Khánh Hòa, họ đang xây ở các tầng đã được cấp phép rất đầy đủ theo quy định.

Điều đáng ghi nhận khi xử lý vụ việc này là UBND tỉnh Khánh Hòa đã kịp thời nhận ra những sai sót của mình và đề ra những giải pháp phù hợp. Kết quả, chủ đầu tư phải thuê nhà thầu ở TP.HCM và sử dụng công nghệ máy cắt dây sợi kim cương để tháo dỡ phần sai phạm. Bê tông cốt thép được cắt từng khối nhỏ và chuyển xuống đất bằng cần cẩu, nhằm đảm bảo kết cấu công trình không bị ảnh hưởng.

Rõ ràng việc xử lý sai phạm ở dự án Mường Thanh Khánh Hòa khó khăn hơn nhiều so với 12 dự án của Mường Thanh ở Hà Nội, vừa phải dũng cảm sửa sai của chính mình, vừa phải đàm phán với chủ đầu tư để hài hòa lợi ích. Chính vì sai phạm được xử lý từ khi còn trứng nước, chưa liên quan đến lợi ích của nhiều bên nên hậu quả để lại rất hạn hẹp!

PHÉP THỬ LỚN VỀ LẬP LẠI KỶ CƯƠNG

Trở lại Nghị quyết của HĐND và phương án chỉ đạo của UBND TP Hà Nội trong vụ việc mang tên Mường Thanh. Điều đáng ghi nhận trong tinh thần xuyên suốt khi xử lý sai phạm lần này là nghiêm khắc với chủ đầu tư và bảo vệ tối đa sự an toàn và lợi ích của người dân.

Các công trình, hạng mục xây dựng sai quy hoạch, giấy phép sẽ được rà soát, phân loại thành hai nhóm: Được tồn tại có điều kiện hoặc phải phá dỡ. Việc phân nhóm căn cứ vào các tiêu chí cụ thể như công trình đã hoàn thành và đưa vào sử dụng, bảo đảm an toàn chịu lực và phòng cháy chữa cháy, đáp ứng chỉ tiêu tối thiểu về hạ tầng kỹ thuật và hạ tầng xã hội thiết yếu, khoảng cách giữa các khối tháp, không vi phạm chỉ giới đường đỏ. Danh mục cụ thể công trình nào được tồn tại, công trình nào phải phá dỡ sẽ do UBND thành phố quyết định sau khi cơ quan chuyên môn rà soát, đánh giá.

> ***Việc xử lý sai phạm ở dự án Mường Thanh Khánh Hòa khó khăn hơn nhiều so với 12 dự án của Mường Thanh ở Hà Nội nhưng vì sai phạm được xử lý từ khi còn trứng nước, chưa liên quan đến lợi ích của nhiều bên nên hậu quả để lại rất hẹp.***

Với chủ đầu tư, phải thực hiện đầy đủ nghĩa vụ tài chính, biện pháp khắc phục hậu quả và chịu các chi phí phát sinh do vi phạm của mình; không sử dụng ngân sách nhà nước để chi trả các chi phí này. Với công trình được tồn tại có điều kiện, chủ đầu tư còn phải nộp lại số tiền thu lợi bất hợp pháp, tính bằng diện tích sàn vi phạm nhân với suất vốn đầu tư tại thời điểm đưa vào sử dụng và nhân 50%.

Với người dân phải di dời ngoài việc được bồi thường bằng tiền còn được ưu tiên mua căn hộ, nhà ở tại các dự án phát triển nhà ở do chủ đầu tư thực hiện, với phương thức thanh toán do hai bên thỏa thuận. Người đủ điều kiện mua theo Luật Nhà ở được ưu tiên mua, thuê mua không qua bốc thăm tại các dự án do chủ đầu tư thực hiện. Cư dân có thu nhập duy nhất từ kinh doanh tại khối đế bị chuyển đổi công năng được hỗ trợ ổn định sản xuất, kinh doanh một lần bằng 6 tháng lương tối thiểu vùng.

Đối với những căn hộ không thuộc diện di dời, người mua được tiếp tục thực hiện quyền, nghĩa vụ theo hợp đồng, thỏa thuận với chủ đầu tư và không phải nộp các chi phí khắc phục sai phạm…

Tuy nhiên, với nguyên tắc đề ra như vậy vẫn còn không ít lo lắng khi thực thi, đó là liệu chủ đầu tư có đủ tài chính khắc phục hậu quả để người dân nhanh chóng an cư; liệu giá bồi thường có thể bù đắp được khi mua một nơi ở tương đương; liệu quỹ nhà ở xã hội có đủ để đáp ứng nhu cầu đột xuất này khi nguồn lực còn hạn hẹp; liệu lộ trình cấp sổ đỏ cho những căn hộ được phép tồn tại có suôn sẻ...

Tất cả còn đang ở phía trước. Dù sao, đây cũng là một phép thử lớn đối với Hà Nội khi muốn thiết lập kỷ cương ở một cấp độ mới trong lĩnh vực quản lý xây dựng đô thị của Thủ đô!❖

Hiện đại hóa đào tạo, nâng chất lượng nguồn nhân lực hàng hải

> BẢO CHÂU

Trước yêu cầu ngày càng cao về nhân lực phục vụ phát triển kinh tế biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đang đẩy mạnh đổi mới đào tạo theo hướng đa ngành, chuyên sâu, gắn với thực tiễn sản xuất và chuẩn mực quốc tế, hướng tới cung cấp nguồn nhân lực chất lượng cao cho ngành Hàng hải và các lĩnh vực kinh tế biển.

ĐA DẠNG HÓA NGÀNH NGHỀ, NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐÀO TẠO

Là cơ sở đào tạo có thế mạnh trong lĩnh vực hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đảm nhiệm vai trò cung cấp nguồn nhân lực cho nhiều lĩnh vực của nền kinh tế biển, từ vận tải biển, khai thác cảng, logistics, đóng tàu đến cơ khí, điện, tự động hóa và các ngành kỹ thuật, công nghệ liên quan. Trước những thay đổi của thị trường lao động và yêu cầu phát triển mới, Nhà trường xác định đổi mới chương trình, đa dạng hóa loại hình đào tạo và nâng cao chất lượng đầu ra là những nhiệm vụ trọng tâm.

Năm học 2025 - 2026, công tác tuyển sinh đại học chính quy của Nhà trường ghi nhận kết quả tích cực. Với chỉ tiêu 5.200 sinh viên và 55 chuyên ngành, Trường có 28.243 thí sinh đăng ký xét tuyển với 94.199 nguyện vọng; 5.887 thí sinh trúng tuyển, trong đó 5.544 sinh viên nhập học, đạt 107% chỉ tiêu. Điểm trúng tuyển trung bình đạt 22 điểm, tăng 0,4 điểm so với năm 2025. Đáng chú ý, nhóm ngành kỹ thuật, công nghệ chiếm 60% tổng quy mô tuyển sinh toàn trường.

Một trong những điểm nhấn trong đổi mới đào tạo là việc mở rộng các ngành, chương trình thuộc lĩnh vực trọng điểm và công nghệ cao. Trong năm học vừa qua, Nhà trường đã ban hành 2 ngành đào tạo cấp 4 mới là Công nghệ kỹ thuật hóa học và Kỹ thuật công nghiệp; đồng thời xây dựng, đưa vào triển khai 5 chương trình đào tạo mới gồm: Kỹ thuật cơ khí dầu khí và năng lượng; Quản lý môi trường và tài nguyên biển; Cơ khí thông minh và robot; Tự động hóa và điều khiển thông minh; Quản lý dịch vụ logistics hàng hải.

Đáng chú ý, trong số này có 3 chương trình tích hợp đại học - thạc sĩ, lần đầu tiên được triển khai tại Trường. Mô hình đào tạo tích hợp mở thêm hướng phát triển liên thông giữa các trình độ, tạo điều kiện để người học tiếp cận chương trình chuyên sâu hơn, đồng thời hình thành nguồn nhân lực có trình độ chuyên môn cao, đáp ứng yêu cầu của các lĩnh vực kỹ thuật và công nghệ.

Ở trình độ sau đại học, Nhà trường tiếp tục rà soát, cập nhật chương trình đào tạo theo yêu cầu đổi mới sáng tạo và năng lực số; mở mới 2 ngành thạc sĩ là Quản trị kinh doanh và Kỹ thuật cơ khí, xây dựng chương trình đào tạo tiến sĩ ngành Kỹ thuật xây dựng. Công tác tuyển sinh sau đại học cũng đạt kết quả tích cực với 29 nghiên cứu sinh trúng tuyển, đạt 241% chỉ tiêu và 465 học viên cao học, đạt 145% chỉ tiêu. Mô hình lớp Tiền Thạc sĩ tiếp tục được triển khai, tuyển được 89 sinh viên thuộc 7 chuyên ngành, góp phần tạo nguồn cho đào tạo trình độ cao hơn.

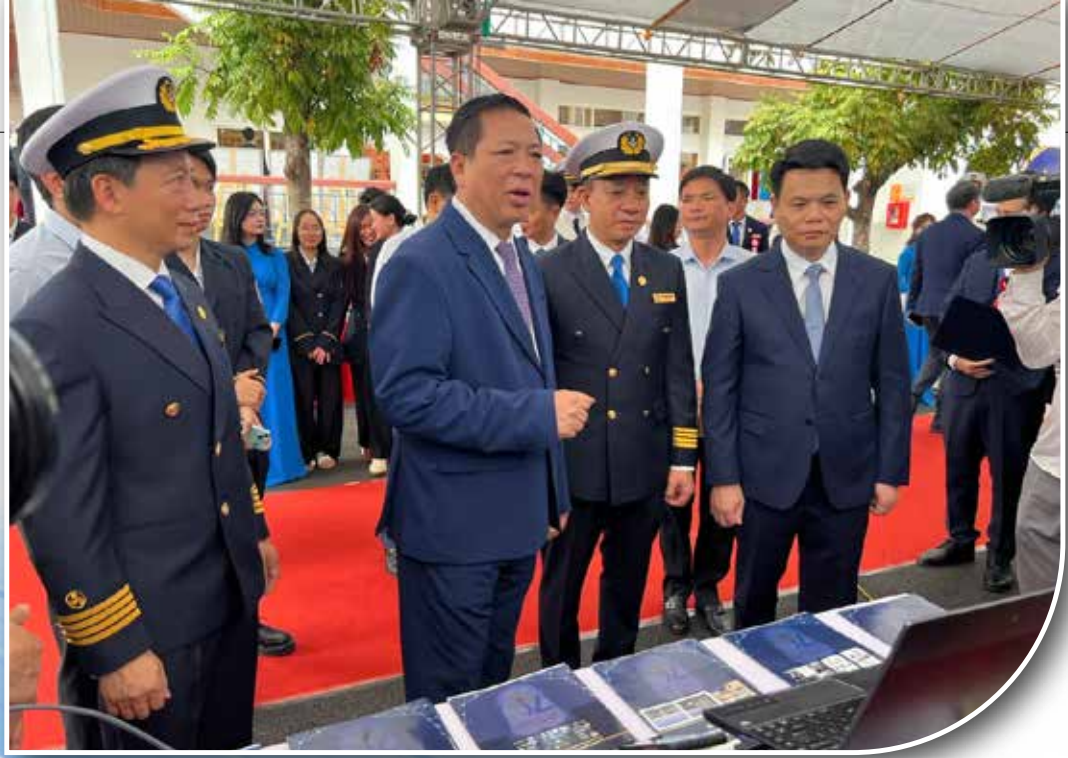
Bên cạnh đào tạo chính quy, Trường mở rộng các loại hình vừa làm vừa học, liên thông và đào tạo từ xa. Trong năm học 2025 - 2026, các hệ này tuyển sinh được 704 học viên, vượt chỉ tiêu 650. Đặc biệt, chương trình đào tạo từ xa lần đầu tiên được tổ chức trên hệ thống VMU-LMS với 3 chuyên ngành: Quản trị kinh doanh, Ngôn ngữ Anh và Luật Hàng hải. Đây là hướng triển khai nhằm mở rộng cơ hội học tập, đáp ứng nhu cầu nâng cao trình độ của người học ở nhiều địa bàn khác nhau.

Cùng với mở rộng quy mô và ngành nghề, chất lượng học tập được Nhà trường quan tâm thông qua việc cải tiến chương trình đào tạo, tăng cường triển khai mô hình CDIO, phân tích kết quả học tập theo từng học kỳ, nhóm sinh viên và học phần để có giải pháp điều chỉnh phù hợp. Theo báo cáo năm học 2025 -2026, tỷ lệ sinh viên đại học xếp loại xuất sắc, giỏi và khá tăng so với năm học trước; tỷ lệ sinh viên xếp loại trung bình và yếu giảm. Kết quả thi Olympic cấp quốc gia của Trường đạt 60 giải, tăng so với 57 giải của năm học 2024 - 2025.

Trong công tác xét tốt nghiệp, năm học 2025 - 2026, Nhà trường có 3.233 sinh viên tốt nghiệp các hệ đào tạo, trong đó 2.990 sinh viên đại học chính quy. Tỷ lệ sinh viên tốt nghiệp của khóa 60 đạt 74,1%, tăng 0,8% so với khóa 59; tỷ lệ tốt nghiệp đúng hạn đạt 46,3%, tăng 1 điểm phần trăm so với năm học trước. Ở trình độ sau đại học, Nhà trường công nhận và cấp bằng cho 6 tiến sĩ, 290 thạc sĩ; tỷ lệ học viên cao học tốt nghiệp đúng hạn đạt 75,2%.

GẮN ĐÀO TẠO VỚI THỰC TIỄN, CHUẨN HÓA THEO YÊU CẦU NGHỀ NGHIỆP

Đối với lĩnh vực hàng hải, chất lượng nguồn nhân lực không chỉ được đánh giá qua kiến thức chuyên môn mà còn phụ thuộc rất lớn vào kỹ năng thực hành, năng lực xử lý tình huống và khả



Bộ trưởng Bộ Xây dựng Trần Hồng Minh thăm khu triển lãm thành tựu khoa học công nghệ nhân kỷ niệm 70 năm ngày thành lập Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

năng đáp ứng các tiêu chuẩn nghề nghiệp. Nhận thức rõ yêu cầu này, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam chú trọng kết hợp đào tạo lý thuyết với thực hành, thực tập và huấn luyện chuyên ngành. Đối với sinh viên hai ngành Điều khiển tàu biển và Khai thác máy tàu biển, Nhà trường tổ chức học tập, huấn luyện trên tàu VMU Việt - Hàn, tạo điều kiện để người học tiếp cận môi trường hoạt động thực tế, rèn luyện kiến thức và kỹ năng chuyên môn gắn với công việc trên tàu.

Đặc biệt, công tác đào tạo, huấn luyện thuyền viên và hoa tiêu hàng hải tiếp tục là lĩnh vực có thế mạnh của Trường. Trong năm học 2025 - 2026, Nhà trường đã tổ chức giảng dạy, cấp mới, gia hạn và cập nhật 11.848 giấy chứng nhận huấn luyện nghiệp vụ hàng hải cùng 640 chứng chỉ thuyền viên đường thủy nội địa.

Các nội dung đào tạo, huấn luyện được cập nhật, chuẩn hóa theo các tiêu chuẩn của Tổ chức Hàng hải quốc tế (IMO) và Công ước quốc tế về tiêu chuẩn huấn luyện, cấp chứng chỉ và trực ca đối với thuyền viên (STCW). Nhà trường cũng xây dựng, đưa vào áp dụng bộ ngân hàng câu hỏi sát hạch trắc nghiệm và hướng dẫn trả lời dành cho thuyền viên, hoa tiêu; biên soạn mới bài giảng cho 10 chương trình huấn luyện hàng hải và hơn 50 chương trình bồi dưỡng chuyên sâu theo đặt hàng trực tiếp từ các doanh nghiệp hàng hải lớn.

Chất lượng đào tạo, huấn luyện của Nhà trường cũng được đánh giá thông qua các hoạt động kiểm tra, đánh giá theo tiêu chuẩn quốc tế. Tháng 12/2025, hệ thống đào tạo, huấn luyện thuyền viên và hoa tiêu hàng hải của Trường đã được Đoàn đánh giá ngoài của Cơ quan An toàn Hàng hải châu Âu (EMSA) kiểm tra, ghi nhận kết quả tốt.

Bên cạnh đào tạo nhân lực đi biển, Nhà trường cũng chú trọng phát triển các chương trình đào tạo ngắn hạn, bồi dưỡng và đào tạo lại theo nhu cầu của cơ quan, doanh nghiệp trong các lĩnh vực hàng hải, logistics, cảng biển, đóng tàu, kỹ thuật ô tô, tự động hóa và một số lĩnh vực chuyên môn khác

Trong năm học 2026 - 2027 và những năm tiếp theo, Nhà trường định hướng tiếp tục mở rộng các chương trình đào tạo nâng cao, chương trình tích hợp cử nhân - thạc sĩ, chương trình giảng dạy bằng tiếng Anh và các ngành thuộc lĩnh vực STEM. Cùng với đó là phát triển các khóa đào tạo ngắn hạn, đào tạo lại và bồi dưỡng chuyên môn theo đặt hàng; tiếp tục cập nhật chương trình theo khung trình độ quốc gia, chuẩn cơ sở giáo dục đại học và chuẩn chương trình đào tạo.



Đổi mới chương trình, đa dạng hóa loại hình đào tạo và nâng cao chất lượng đầu ra là những nhiệm vụ trọng tâm của Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Theo lộ trình thực hiện Đề án xây dựng Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trở thành trường trọng điểm quốc gia, quy mô đào tạo đại học chính quy dự kiến đạt 26.000 - 28.000 sinh viên vào năm 2030, trong đó nhóm ngành kỹ thuật, công nghệ chiếm từ 65% trở lên. Để đáp ứng mục tiêu này, yêu cầu đặt ra là phải gắn phát triển quy mô với nâng cao chất lượng đào tạo, bảo đảm đội ngũ giảng viên và điều kiện thực hành, thực tập cho người học.

Với định hướng lấy chất lượng đào tạo và nhu cầu xã hội làm cơ sở phát triển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đang từng bước hoàn thiện hệ thống đào tạo đa trình độ, đa lĩnh vực, trong đó các ngành Hàng hải và Kinh tế biển tiếp tục giữ vai trò nòng cốt. Đổi mới chương trình, tăng cường thực hành, chuẩn hóa theo tiêu chuẩn nghề nghiệp và mở rộng đào tạo theo nhu cầu doanh nghiệp sẽ là những yếu tố quan trọng để Nhà trường nâng cao chất lượng nguồn nhân lực, đóng góp thiết thực cho sự phát triển của ngành Hàng hải và kinh tế biển Việt Nam.

CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG LẮP GHÉP:

Đào tạo nhân lực phải đi trước một bước



Ông Ngô Văn Hiệu

> **YÊN THƯ** (thực hiện)

Ứng dụng kết cấu thép nhẹ và công nghệ xây dựng lắp ghép đang làm thay đổi phương thức tổ chức sản xuất, thi công và yêu cầu đối với người lao động. Trao đổi với phóng viên Tạp chí Xây dựng, ông Ngô Văn Hiệu - Tổng giám đốc Công ty CP Cơ khí và Vật liệu xây dựng Phú Nguyễn (Phú Nguyễn Steel) cho rằng, đào tạo nhân lực gắn với thực tiễn là yếu tố quan trọng để mở rộng ứng dụng công nghệ mới.

Ông đánh giá như thế nào về xu hướng phát triển và ứng dụng kết cấu thép nhẹ, công nghệ xây dựng lắp ghép trong bối cảnh ngành Xây dựng đang hướng tới sử dụng vật liệu hiệu quả và giảm phát thải?

- Theo tôi, đây là xu hướng tất yếu của ngành Xây dựng trong tương lai. Việt Nam đang đứng trước yêu cầu nâng cao năng suất lao động, tiết kiệm tài nguyên, giảm phát thải và rút ngắn thời gian thi công.

Công nghệ kết cấu thép nhẹ G550 và xây dựng lắp ghép cho phép chuyển một phần lớn công việc từ công trường về nhà máy, nơi các yếu tố về chất lượng, vật liệu và tiến độ có thể được kiểm soát tốt hơn.

Cơ hội phát triển tại Việt Nam rất lớn khi nhu cầu nhà ở, nhà công nghiệp, khu nghỉ dưỡng và nhà ở xã hội ngày càng tăng. Tuy nhiên, những thách thức hiện nay là nhận thức của thị trường, hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật và đặc biệt là nguồn nhân lực có khả năng tiếp cận, ứng dụng công nghệ mới.

Việc chuyển từ thi công truyền thống sang sản xuất cấu kiện thép nhẹ bằng công nghệ CNC và lắp dựng tại công trường làm thay đổi yêu cầu đối với nguồn nhân lực như thế nào, thưa ông?

- Tôi thấy, sự thay đổi lớn nhất là chuyển từ tư duy lao động thủ công sang tư duy sản xuất công nghiệp. Trước đây, người thợ xây dựng chủ yếu dựa vào kinh nghiệm và kỹ năng thi công trực tiếp tại công trường.

Với công nghệ mới, người lao động cần biết đọc bản vẽ kỹ thuật, hiểu cấu tạo hệ thống, sử dụng thiết bị và tuân thủ quy trình sản xuất, lắp dựng. Doanh nghiệp cần đội ngũ kỹ thuật viên thiết kế, nhân sự vận hành máy CNC, công nhân lắp ráp cấu kiện và bộ phận giám sát chất lượng có chuyên môn.

Điều này không có nghĩa là lao động truyền thống mất đi cơ hội việc làm. Ngược lại, họ cần được đào tạo lại để thích ứng với phương thức sản xuất mới. Đây cũng là cơ hội để nâng cao thu nhập và tính chuyên nghiệp của người lao động.

Vậy ở Phú Nguyễn Steel, việc tổ chức đào tạo, hướng dẫn và chuyển giao công nghệ cho đội ngũ kỹ thuật, công nhân và nhà thầu thi công được thực hiện như thế nào?

- Chúng tôi xác định đào tạo nhân lực phải gắn trực tiếp với sản xuất và công trình thực tế. Đối với đội ngũ kỹ thuật, doanh nghiệp tập trung đào tạo thiết kế kết cấu, sử dụng phần mềm Vertex BD, bóc tách vật tư và triển khai bản vẽ sản xuất.

Với công nhân nhà máy, nội dung đào tạo trọng tâm là vận hành máy CNC, gia công cấu kiện, kiểm soát kích thước và thực hiện quy trình kiểm tra chất lượng.

Đối với nhà thầu và thợ lắp dựng, chúng tôi chú trọng hướng dẫn kỹ năng đọc bản vẽ, nhận diện cấu kiện, thực hiện liên kết, lắp dựng đúng trình tự và bảo đảm an toàn lao động.

Quan điểm của Phú Nguyễn Steel là không chỉ đào tạo để người lao động biết sử dụng máy móc, mà còn phải hiểu toàn bộ hệ thống công nghệ, từ thiết kế, sản xuất đến lắp dựng và nghiệm thu.

Từ thực tiễn tham gia công trình thí điểm nhà nhiều tầng lắp ghép phát thải carbon thấp "the LEAP" tại Viện Khoa học công nghệ xây dựng (IBST), doanh nghiệp rút ra những kinh nghiệm gì?

- Công trình thí điểm "the LEAP" tại IBST có quy mô hai tầng, diện tích khoảng 150 m^2, sử dụng hệ khung thép nhẹ làm kết cấu chính, kết hợp các giải pháp tường, vách ngăn, trần và hoàn thiện phù hợp.



Phú Nguyễn Steel xác định đào tạo nhân lực phải gắn trực tiếp với sản xuất và công trình thực tế.



Phú Nguyễn Steel là nhà cung cấp khung thép nhẹ - vật liệu kết cấu cốt lõi cho công trình "the LEAP" tại IBST.

Là đơn vị cung cấp hệ khung thép nhẹ, Phú Nguyễn Steel đã tham gia cung cấp mẫu sản phẩm, hồ sơ kỹ thuật; đồng phát triển chi tiết liên kết, phương pháp chế tạo, vận chuyển, lắp dựng và chia sẻ một nửa chi phí thi công phần khung thép.

Qua thực tiễn triển khai, chúng tôi nhận thấy yếu tố quyết định thành công không chỉ nằm ở vật liệu hay máy móc mà còn phụ thuộc vào sự đồng bộ giữa thiết kế, sản xuất, nhân lực và tổ chức thi công.

Một bộ cấu kiện dù được sản xuất chính xác tại nhà máy nhưng nếu đội ngũ lắp dựng không hiểu bản vẽ, không nắm được trình tự liên kết thì vẫn có thể phát sinh sai sót.

Vì vậy, chúng tôi đặc biệt coi trọng ba yếu tố: Chuẩn hóa quy trình kỹ thuật, đào tạo nhân lực trước khi triển khai và kiểm soát chất lượng xuyên suốt từ nhà máy đến công trường.

Bên cạnh đó, an toàn lao động phải được đặt lên hàng đầu. Người lao động cần được hướng dẫn đầy đủ về thiết bị nâng hạ, liên kết cấu kiện, làm việc trên cao và các biện pháp phòng ngừa rủi ro.

Từ các công trình đã triển khai, ông có thể chia sẻ những kết quả cụ thể về thời gian đào tạo, năng suất lao động và tổ chức thi công khi ứng dụng công nghệ kết cấu thép nhẹ?

- Từ thực tế sản xuất và triển khai công trình tại Phú Nguyễn Steel, chúng tôi ghi nhận một số kết quả đáng chú ý.

Về đào tạo nhân lực, thời gian trung bình để một công nhân tiếp cận và thực hiện các công việc lắp dựng hệ thống kết cấu thép nhẹ khoảng hai tuần. Đây là điều kiện thuận lợi để người lao động từ các ngành nghề xây dựng truyền thống có thể chuyển đổi, thích ứng với công nghệ mới.

Về năng suất lao động, bình quân cần khoảng 1,2 - 1,5 công thợ/m^2 sàn để triển khai lắp dựng hoàn chỉnh, từ hệ khung kết cấu đến hệ thống bao che.

Về tổ chức nhân lực, khi thi công dự án Phố cổ Hoa Lư (Ninh Bình) với quy mô hơn 100 căn và chiều dài triển khai khoảng 630 m, chúng tôi sử dụng lực lượng công nhân bình quân khoảng 40 người. Toàn bộ dự án được triển khai trong 75 ngày.

Điểm quan trọng là phần lớn cấu kiện được sản xuất trước tại nhà máy bằng công nghệ CNC, sau đó vận chuyển đến công trường để lắp dựng theo bản vẽ và quy trình đã chuẩn hóa.

Những kết quả này cho thấy công nghệ xây dựng lắp ghép có khả năng rút ngắn thời gian thi công và giảm sự phụ thuộc vào lao động thủ công có tay nghề cao tại công trường.

Trong bối cảnh thị trường lao động xây dựng Việt Nam thiếu thợ lành nghề, chi phí nhân công tăng và lao động trẻ ít mặn mà với các công việc nặng nhọc tại công trường, thì đây là hướng đi thiết thực.

Mục tiêu của chúng tôi không phải thay thế người lao động bằng máy móc, mà sử dụng công nghệ để mỗi người lao động có thể tạo ra giá trị và năng suất cao hơn.

Để mở rộng ứng dụng công nghệ xây dựng lắp ghép, đặc biệt trong phát triển nhà ở xã hội, theo ông, cần đổi mới hoạt động đào tạo và tăng cường hợp tác giữa doanh nghiệp với các cơ sở giáo dục, viện nghiên cứu như thế nào?

- Theo tôi, muốn công nghiệp hóa ngành Xây dựng phải bắt đầu từ đổi mới đào tạo nguồn nhân lực.

Các trường nghề và trường đại học cần cập nhật chương trình theo hướng tăng thực hành, đưa công nghệ sản xuất cấu kiện, thiết kế bằng phần mềm, vận hành máy CNC và lắp dựng kết cấu thép nhẹ vào nội dung đào tạo.

Doanh nghiệp cần tham gia sâu hơn vào quá trình này thông qua cung cấp môi trường thực hành, thiết bị, công trình thực tế và đặt hàng nhân lực theo nhu cầu sản xuất.

Đặc biệt, cần hình thành mối liên kết thực chất giữa ba bên: Doanh nghiệp cung cấp năng lực sản xuất và thực tiễn ứng dụng; nhà trường cung cấp nguồn nhân lực; viện nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học, tiêu chuẩn và kiểm chứng công nghệ.

Tại Phú Nguyễn Steel, chúng tôi mong muốn mở rộng hợp tác với các trường đại học, trường nghề và viện nghiên cứu để cùng đào tạo đội ngũ kỹ thuật, công nhân lành nghề, từng bước hình thành lực lượng lao động chuyên nghiệp cho ngành công nghiệp xây dựng.

Tôi cho rằng, muốn thay đổi ngành Xây dựng thì không thể chỉ thay đổi vật liệu và máy móc, mà quan trọng hơn là phải thay đổi con người và phương thức tổ chức sản xuất.

Trân trọng cảm ơn ông!

Khi nào có thể mở lại đường sau sạt lở?



> AN NHIÊN

Đất đá đã được dọn khỏi mặt đường, xe cứu hộ có thể qua chưa? Sổ tay của Cục Đường bộ Việt Nam dành riêng một quy trình để xem xét việc này.

Bộ Sổ tay vận hành, khai thác đường bộ trong công tác phòng, chống thiên tai của Cục Đường bộ Việt Nam do Nhà xuất bản Xây dựng xuất bản. Ban biên soạn gồm: Bùi Quang Thái, Nguyễn Thanh Hoài, Nguyễn Hữu Vinh, Nguyễn Tiến Hồng, Nguyễn Vũ Tuấn và Nguyễn Thị Thu Ngà (đồng chủ biên), cùng Cao Hoàng Cẩn, Nguyễn Sỹ Hưng, Nguyễn Văn Thạch, Phạm Ngọc Sơn, Phạm Thị Tuyết Thanh và Bùi Tuấn Anh.

Tập 1, Cơ sở quản lý rủi ro và chuẩn bị vận hành, gồm 10 chương, từ nhận diện và phân vùng nguy cơ đến tổ chức cảnh báo sớm, xác lập các ngưỡng tham khảo để đóng, hạn chế hoặc mở lại đường. Tập 2, Tổ chức ứng phó và vận hành giao thông đường bộ trong thiên tai, đi vào việc phối hợp lực lượng và điều hành giao thông khi sự cố xảy ra.

Trong lời nói đầu Tập 1, nhóm biên soạn đặt một đoạn đường trong quan hệ với cả mạng lưới giao thông. Cùng là một điểm sạt lở, nơi có đường vòng còn có thể phân luồng. Trên tuyến độc đạo, việc đóng một đoạn đường có thể cắt lối vào của xe cấp cứu và làm gián đoạn đi lại của cả khu vực. Vì vậy, khi phân vùng nguy cơ, cuốn sách xem xét cả tình trạng công trình, vai trò của tuyến đường và hậu quả nếu tuyến bị gián đoạn.

Ở Chương 10 của Tập 1, Bảng 10.15 nêu những dấu hiệu để xem xét đóng đường khẩn cấp do sạt lở, trong đó có đất đá chiếm phần xe chạy, vết nứt rộng trên 30 mm hoặc khối trượt đang hoạt động. Khi nguy cơ trực tiếp đã rõ, sổ tay hướng dẫn ưu tiên cô lập đoạn nguy hiểm, bố trí rào chắn, chốt trực, phát cảnh báo và phân luồng theo thẩm quyền.

Đến lúc xem xét mở lại, phải kiểm tra những chỗ mà việc dọn mặt đường chưa xử lý được. Nước có thể đã khoét nền đường. Rãnh thoát nước có thể còn tắc. Trên taluy, vết nứt có thể tiếp tục phát triển hoặc đá vẫn còn treo. Kết quả kiểm tra được ghi bằng hình ảnh, nhật ký hoặc báo cáo hiện trường để làm căn cứ cho quyết định mở lại và theo dõi sau đó.

Bảng 10.16 đưa ra hai mốc tham khảo đối với sạt lở. Khi chỉ số nước trong đất (SWI*) giảm xuống dưới khoảng 0,85, hiện trường không có dấu hiệu sạt tiếp và phần xe chạy đã được xử lý, có thể xem xét mở lại có kiểm soát. Mốc để xem xét mở bình thường là dưới khoảng 0,70, đi cùng kết quả kiểm tra cho thấy mái dốc không còn nước rỉ mạnh, vết nứt phát triển, đá treo hoặc chuyển vị bất thường. Trong sổ tay, các mốc này được dùng cùng kết quả xác minh tại chỗ. Một con số giảm xuống sau mưa chưa đủ để quyết định cho xe qua nếu nền đường và mái dốc chưa được kiểm tra.

Bảng 10.17 dành một dòng riêng cho thông xe phục vụ cứu hộ. Đây là một trong bốn hình thức mở lại đường, bên cạnh thông xe tạm, thông xe có kiểm soát và mở lại bình thường. Nếu hiện trường chỉ đủ điều kiện cho xe cứu hộ, xe y tế hoặc phương tiện thiết yếu đi qua, có thể bố trí lực lượng dẫn đường hoặc chốt trực. Khi đã có một phần đường đủ an toàn cho các phương tiện khác, có thể tổ chức cho xe qua một làn, theo khung giờ hoặc theo nhóm phương tiện. Lực lượng quản lý tuyến vẫn phải theo dõi hiện trường sau khi mở.

Chi tiết dành lối cho xe cứu hộ cũng cho thấy việc chuẩn bị trước mùa mưa cần cụ thể đến đâu. Với một tuyến độc đạo, phương án phải tính được điểm sạt có thể chia cắt khu vực nào, lực lượng kiểm tra tiếp cận từ phía nào và có thể đặt chốt ở đâu. Đó là những việc có thể chuẩn bị khi đường còn thông. Đến lúc xảy ra sạt lở, người quản lý mới có căn cứ để quyết định đoạn nào phải đóng, phần đường nào có thể sử dụng và xe nào cần được qua trước.

Bộ Sổ tay giúp đơn vị quản lý đường bộ chuẩn bị phương án cho từng tuyến trước mùa mưa. Khi xảy ra sạt lở, lực lượng tại chỗ có căn cứ để xác định đoạn nào cần đóng, kiểm tra những gì trước khi mở lại và khi nào có thể dành lối an toàn cho xe cứu hộ.❖

■Ngày nhận bài: 20/8/2026 ■Ngày sửa bài: 28/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2026

Từ khái niệm hóa đến chỉ báo: Khung kiểm tra tính nhất quán trong đánh giá chất lượng không gian ở môi trường cư trú

From conceptualization to indicators: A consistency framework for assessing spatial quality in residential environments

> TS TRẦN MAI ANH[1], TS ĐỖ XUÂN SƠN[2], THS NGUYỄN THANH XUÂN YẾN[3,*]
[1]Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]Trường Đại học Công nghệ TP.HCM
[3]Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
[*]Corresponding author: Email: nguyenthanhxuanyen@mtu.edu.vn

TÓM TẮT

Chất lượng không gian thường được sử dụng để đánh giá môi trường cư trú, nhưng các nghiên cứu không gian thường không giống nhau về cách khái niệm hóa và đo lường. Chất lượng không gian có thể được tiếp cận từ thuộc tính không gian, hiệu quả sử dụng, trải nghiệm người dùng hoặc sự tương tác giữa không gian và con người. Vì vậy, vấn đề không chỉ là đo lường những gì, mà còn là vì sao phải đo, đo như thế nào và kết quả cho biết những gì. Nghiên cứu này tổng hợp 34 nghiên cứu, bằng phương pháp tổng quan có cấu trúc, tập trung vào khái niệm hóa, logic đánh giá, thành phần, chỉ báo và cách đo lường. Kết quả cho thấy khái niệm hóa thường định hướng logic đánh giá nhưng không quyết định duy nhất logic đánh giá. Hệ thống đo lường cũng phân hóa về thành phần, chỉ báo và cách đo; do đó, tên gọi của chỉ báo không đủ để xác định nội dung thực sự được đo. Quan trọng hơn, giá trị của chỉ báo không đồng nghĩa với Chất lượng không gian cao hay thấp mà còn phụ thuộc vào hướng tác động, dạng quan hệ và điều kiện áp dụng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất quy trình định hướng 6 bước gồm: khái niệm hóa, logic đánh giá, lựa chọn thành phần và chỉ báo, đo lường và diễn giải kết quả. Quy trình này giúp kiểm tra sự liên kết giữa cách hiểu chất lượng không gian và các yếu tố được sử dụng để đánh giá, thay vì chỉ là tập hợp một danh sách chỉ báo.

Từ khóa: Chất lượng không gian; đánh giá không gian; khả năng không gian; tổng quan tài liệu; quy trình đánh giá.

ABSTRACT

Spatial quality is widely used to assess residential environments, yet studies vary substantially in how spatial quality is conceptualized and measured. It may be understood in terms of spatial attributes, functional performance, user experience, or interactions between space and people. Accordingly, the challenge is not simply to determine what should be measured, but also to clarify why it should be measured, how it should be measured, and what the resulting evidence indicates about spatial quality. This study synthesizes 34 studies through a structured literature review, focusing on conceptualization, assessment logic, measurement components, indicators, and measurement methods. The findings show that conceptualization generally guides the assessment logic, but does not uniquely determine it. Measurement systems also vary in their components, indicators, and methods; therefore, an indicator label alone is insufficient to establish what is actually being measured. More importantly, an indicator value does not inherently indicate higher or lower spatial quality, as it depends on the direction and form of the relationship and the conditions under which the relationship applies. Based on these findings, the study proposes a six-step guiding process encompassing conceptualization, assessment logic, selection of measurement components and indicators, measurement, and interpretation of results. Rather than simply compiling a list of indicators, the proposed process helps examine the consistency between how spatial quality is understood and the evidence used to assess it.

Keywords: Spatial quality; spatial assessment; spatial affordance; structured literature review; assessment process.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chất lượng không gian là một nội dung quan trọng trong đánh giá môi trường không gian nhưng chưa được tiếp cận theo một cách thống nhất. Các nghiên cứu có thể xem chất lượng không gian là thuộc tính của không gian [1], khả năng thực hiện chức năng [2], trải nghiệm của người sử dụng [3] hoặc kết quả của sự tương tác giữa không gian và con người [4]. Cách hiểu khác nhau dẫn đến những cơ sở đánh giá và cách đo lường khác nhau.

Sự khác biệt không chỉ nằm ở đo cái gì, mà còn ở cách chuyển cách hiểu về chất lượng không gian thành hệ thống đo lường. Các nghiên cứu sử dụng nhiều nhóm thành phần, chỉ báo và phương thức đo; cùng một nội dung có thể được đo bằng đặc điểm vật lý hoặc nhận định của người sử dụng. Do đó, việc tập hợp các chỉ báo đã được sử dụng chưa đủ để bảo đảm chúng cùng đo một nội dung hoặc có cùng ý nghĩa đối với chất lượng không gian.

Hơn nữa, giá trị của một chỉ báo không đủ để đánh giá chất lượng không gian cao hay thấp. Chất lượng không gian còn phụ thuộc vào mối quan hệ giữa chỉ báo, kết quả chất lượng và điều kiện áp dụng. Vì vậy, cần bảo đảm sự liên kết từ khái niệm hóa, logic đánh giá, thành phần, chỉ báo và cách đo đến diễn giải kết quả.

Do đó, Khoảng trống nghiên cứu không nằm ở việc thiếu chỉ báo, mà ở việc thiếu một cách tiếp cận có trình tự để liên kết các mắt xích này thành một hệ thống đánh giá nhất quán. Nghiên cứu này tổng hợp 34 nghiên cứu nhằm làm rõ: (i) mối liên hệ giữa khái niệm hóa và logic đánh giá; (ii) cách thành phần được triển khai thành chỉ báo và phương thức đo lường. Từ đó đề xuất quy trình định hướng sáu bước từ khái niệm hóa đến diễn giải kết quả. Và, nghiên cứu này không nhằm xây dựng một bộ chỉ báo chuẩn hóa hay hệ thống đánh giá áp dụng phổ quát.

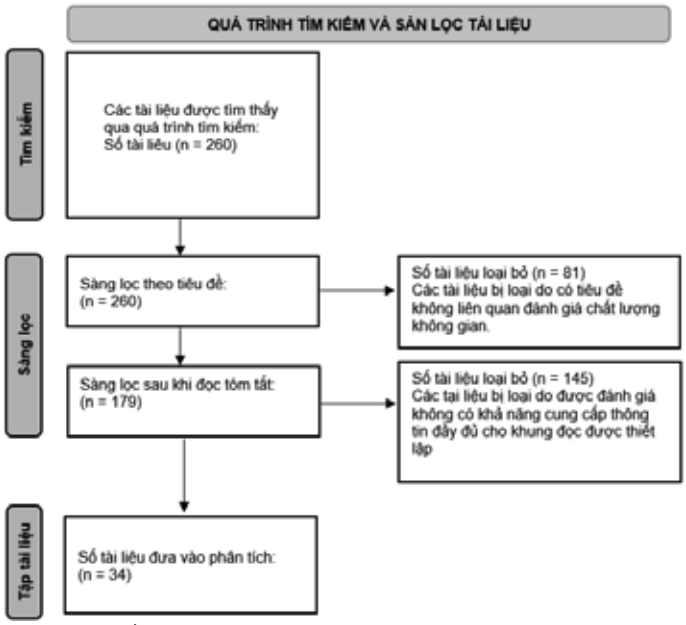
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng tổng quan tài liệu có cấu trúc để tổng hợp và đối chiếu cách chất lượng không gian được khái niệm hóa, đánh giá và đo lường trong môi trường cư trú, bao gồm khu ở, khu dân cư, nhà ở và khu định cư.

Tài liệu được tìm kiếm trên Dimensions.ai, trong trường tiêu đề và tóm tắt, giới hạn ở loại tài liệu là bài báo. Chuỗi tìm kiếm gồm:

("spatial quality" OR "quality of space") AND (residential OR neighbourhood OR neighborhood OR housing OR settlement OR "residential area").

Dimensions.ai được lựa chọn vì là cơ sở dữ liệu mở, có phạm vi bao quát liên ngành và đáp ứng yêu cầu tìm kiếm, sàng lọc tài liệu theo phạm vi và khung phân tích của nghiên cứu. Kết quả ban đầu có 260 bài. Sàng lọc được thực hiện qua hai bước: đọc tiêu đề để loại 81 bài không phù hợp với phạm vi nghiên cứu, còn 179 bài; sau đó đọc tóm tắt để đánh giá khả năng cung cấp thông tin theo khung đọc được thiết lập trước. Khung đọc xác định các nội dung cần tìm kiếm trong mỗi nghiên cứu, gồm khái niệm hóa, logic đánh giá, thành phần đo lường, chỉ báo và cách đo lường... Ở bước này, 145 tài liệu được đánh giá không có khả năng cung cấp đầy đủ chuỗi thông tin cần thiết theo khung đọc và được loại khỏi phân tích toàn văn. Một nghiên cứu có thể cung cấp thông tin cho một hoặc một số trường của khung đọc, nhưng chỉ những nghiên cứu có khả năng cung cấp đầy đủ các trường từ khái niệm hóa, logic đánh giá, thành phần đo lường, chỉ báo đến cách đo lường mới được giữ lại. Cuối cùng, 34 nghiên cứu được giữ lại để phân tích toàn văn; quy trình lựa chọn được trình bày tại Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ lựa chọn tài liệu

Mỗi nghiên cứu được xem là một nguồn bằng chứng. Nội dung được trích xuất và chuẩn hóa theo hệ thống quy tắc mã hóa xác định trước, gồm: khái niệm, logic đánh giá, thành phần đo lường, chỉ báo và cách đo lường. Khái niệm hóa ghi nhận cách nghiên cứu xác định chất lượng không gian; logic đánh giá xác định cơ sở được sử dụng để đánh giá; thành phần đo lường xác định các khía cạnh được đưa vào đánh giá; chỉ báo xác định thuộc tính được sử dụng để thể hiện thành phần; và cách đo lường xác định cách chỉ báo được chuyển thành bằng chứng có thể quan sát hoặc định lượng. Các quyết định mã hóa, phân loại có thể truy nguyên về bằng chứng nguồn, tuân theo các sổ quy tắc được thiết lập trước và được đối chiếu, thống nhất giữa các thành viên nhóm nghiên cứu.

Sau khi mã hóa, các nghiên cứu được đối chiếu để nhận diện mối liên hệ giữa cách khái niệm hóa và logic đánh giá, đồng thời tổng hợp thành phần, chỉ báo và cách đo lường để nhận diện cấu trúc và mức độ phân hóa của hệ thống đo lường. Khi nghiên cứu nguồn cung cấp các minh chứng rõ ràng về quan hệ giữa chỉ báo và chất lượng không gian, quan hệ này được ghi nhận để hỗ trợ diễn giải kết quả; nghiên cứu không suy diễn quan hệ khi nguồn không cung cấp đủ minh chứng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khái niệm hóa và logic đánh giá chất lượng không gian

Khái niệm chất lượng không gian được mã hoá phân loại theo bốn hướng chính xem Bảng 1.

Bảng 1. Phân loại cách khái niệm hóa chất lượng không gian

Cách khái niệm hóa chất lượng không gian	Số nghiên cứu
Chất lượng không gian như thuộc tính không gian	9
Chất lượng không gian như trải nghiệm của con người	5
Chất lượng không gian như hiệu năng không gian	10
Chất lượng không gian như thuộc tính của hệ thống	10

Bên cạnh đó có 5 logic đánh giá được nhận diện (Bảng 2). Phân loại này dựa vào cơ sở mà nghiên cứu sử dụng để nhận biết chất lượng không gian:

Bảng 2. Phân loại logic đánh giá chất lượng không gian

Logic đánh giá	Số nghiên cứu
Đánh giá dựa trên thuộc tính	7
Đánh giá dựa trên hiệu năng	6
Đánh giá dựa trên nhận định của con người	2
Đánh giá dựa trên tương tác và cân bằng	5
Đánh giá dựa trên không gian vật lý và phản ứng của con người	14

Xem xét từng tài liệu theo quan hệ phân loại, chẳng hạn tài liệu 1 với phân loại khái niệm A, logic đánh giá B có thể nhận thấy: xem Chất lượng không gian là thuộc tính không gian thì có thể đánh giá qua các đặc điểm vật lý, hình thái và cấu trúc [5]. Xem là hiệu năng thì tập trung vào khả năng thực hiện chức năng và đáp ứng nhu cầu [6]. Xem là trải nghiệm của con người thì chú trọng mối quan hệ giữa đặc điểm không gian và phản ứng của người sử dụng [3]. Còn xem là thuộc tính của hệ thống thì có thể dựa trên sự tương tác hoặc cân bằng giữa các thành phần [7].

Tuy nhiên, các cách tiếp cận giữa khái niệm và logic đánh giá không tạo thành những cặp cố định duy nhất: logic đánh giá dựa trên thuộc tính không gian có thể sử dụng cho khái niệm về chất lượng không gian dưới dạng thuộc tính không gian [8] đồng thời vẫn có thể sửa dụng trong khái niệm chất lượng không gian dưới dạng trải nghiệm của con người [9].

Do đó, khái niệm định hướng nhưng không quyết định duy nhất logic đánh giá; quan trọng là bảo đảm cơ sở đánh giá phù hợp với cách Chất lượng không gian được xác định. Từ đây đặt ra vấn đề tiếp theo: các cơ sở đánh giá này được chuyển thành những thành phần và đại lượng nào để đo lường?

3.2. Thành phần, chỉ báo và cấu trúc đo lường

Từ 34 nghiên cứu, 127 thành phần và 570 chỉ báo được mã hóa và quy về 9 nhóm xem Bảng 3.

Bảng 3. Cấu trúc các thành phần và chỉ báo đo lường chất lượng không gian

Nhóm thành phần	Thành phần	Nghiên cứu	Chỉ báo
Cấu trúc & hình thái không gian	32	19	145
Khả năng tiếp cận & kết nối không gian	12	14	58
Hiệu quả công năng & sử dụng không gian	18	16	73
Chất lượng vật lý & môi trường	23	19	131
Cảm nhận & trải nghiệm con người	13	11	62
Tương tác xã hội & cộng đồng	9	8	37
An toàn, an ninh & phúc lợi	8	7	31
Quản lý, bảo trì & bối cảnh kinh tế-xã hội	7	6	22
Các thành phần tổng hợp/liên ngành	5	5	11
Tổng	127	-	570

Lưu ý: Số nghiên cứu ở mỗi nhóm là số nghiên cứu có ít nhất một thành phần thuộc nhóm tương ứng; một nghiên cứu có thể đóng góp vào nhiều nhóm, do đó tổng số lượt nghiên cứu giữa các nhóm không bằng tổng số nghiên cứu được phân tích (34)

Sự phân bố cho thấy số lượng thành phần không đồng nhất với mức độ phong phú của chỉ báo. Cấu trúc và hình thái không gian có 32 thành phần và 145 chỉ báo, trong khi Chất lượng vật lý và môi trường có 23 thành phần nhưng 131 chỉ báo, tương ứng trung bình khoảng 4,5 và 5,7 chỉ báo mỗi thành phần. Điều này cho thấy cùng một nhóm nội dung có thể được cụ thể hóa ở mức độ khác nhau tùy mục tiêu đánh giá.

Mối quan hệ giữa thành phần và chỉ báo không cố định. Một thành phần có thể được cụ thể hóa bằng nhiều loại chỉ báo. Chẳng hạn, cấu trúc và hình thái không gian có thể được đánh giá qua quy mô, tỷ lệ, khoảng cách, mật độ hoặc hình dạng; các nghiên cứu cũng sử dụng quan hệ giữa chiều cao công trình và không gian, mật độ xây dựng hoặc mức độ sử dụng đất để mô tả các đặc điểm này [10]. Vì vậy, một thành phần không tương ứng với một chỉ báo duy nhất mà được cụ thể hóa khác nhau tùy nội dung và mục tiêu đánh giá.

Sự khác biệt còn thể hiện ở cách một nội dung được chuyển thành bằng chứng đo lường. Khả năng tiếp cận có thể được đánh giá qua điều kiện vật lý có thể đo trực tiếp hoặc qua mức độ thuận tiện mà người sử dụng cảm nhận [11, 12]. Tương tự, sự thoải mái về môi trường có thể được đánh giá từ điều kiện môi trường thực tế hoặc cảm nhận của người sử dụng [6]. Do đó, tên gọi của thành phần hoặc chỉ báo chưa đủ để xác định nội dung và cách thức đo lường.

Từ đó, thành phần, chỉ báo và phương thức đo tạo thành một cấu trúc liên kết: cách lựa chọn thành phần định hướng cách triển khai thành chỉ báo, trong khi phương thức đo quyết định cách chỉ báo được chuyển thành bằng chứng. Bảng 4 tổng hợp các thành phần, chỉ báo và phương thức đo tiêu biểu được ghi nhận trong 34 nghiên cứu.

Bảng 4. Các chỉ báo và phương thức đo lường tiêu biểu theo nhóm thành phần

Thành phần đo lường	Các chỉ báo tiêu biểu	Phương thức đo lường tiêu biểu
Cấu trúc và hình thái không gian	Diện tích; chiều rộng và chiều sâu; mật độ xây dựng; tỷ lệ chiều cao công trình/chiều rộng đường; kết nối và tích hợp; độ khép kín	Đo đạc hình học; GIS; tính toán tỷ lệ, mật độ và chỉ số hình thái; phân tích cấu trúc và mạng lưới
Khả năng tiếp cận và kết nối không gian	Khả năng tiếp cận giao thông công cộng; khoảng cách đến tiện ích; khả năng đi bộ; kết nối mạng đường; lối đi không vật cản	Khoảng cách và mạng lưới; GIS và vùng đệm; thời gian di chuyển; kiểm tra điều kiện tiếp cận; khảo sát
Hiệu quả công năng và sử dụng không gian	Mức độ sử dụng; cường độ hoạt động; tần suất và thời lượng sử dụng; mức độ đầy đủ tiện ích; khả năng thích ứng; khả năng thực hiện chức năng	Quan sát hành vi; ghi nhận hoạt động; khảo sát; đo diện tích và bố trí; đánh giá chức năng

Chất lượng vật lý và môi trường	Đường; vỉa hè; công trình; cây xanh; bầu trời; độ mở; ánh sáng; tiếng ồn; tiện nghi môi trường	Đo trực tiếp; quan trắc; kiểm toán hiện trường; phân tích ảnh; GIS
Cảm nhận và trải nghiệm con người	Sự hài lòng; an toàn cảm nhận; thoải mái; vẻ đẹp; sức sống; cảm giác thuộc về; mức độ hấp dẫn	Khảo sát; thang đánh giá; xếp hạng; phỏng vấn; thực nghiệm thực tế ảo; mô hình dự đoán cảm nhận
Tương tác xã hội và cộng đồng	Quan hệ và tương tác xã hội; tham gia cộng đồng; tính xã hội; hội nhập xã hội; hoạt động cộng đồng	Khảo sát; phỏng vấn; quan sát hoạt động; ghi nhận tần suất tương tác
An toàn, an ninh và phúc lợi	An toàn giao thông; tội phạm; phơi nhiễm rủi ro; an toàn chiếu sáng; thoát hiểm; an toàn ngoài trời	Dữ liệu tội phạm/rủi ro; GIS; kiểm toán; kiểm tra hiện trường; phân tích ảnh; khảo sát
Quản lý, bảo trì và bối cảnh kinh tế-xã hội	Khả năng chi trả nhà ở; sở hữu nhà ở; dân số; quá tải; thu nhập; việc làm; quản lý; bảo trì	Dữ liệu hành chính; điều tra kinh tế-xã hội; khảo sát; hồ sơ quản lý; phỏng vấn

Lưu ý: Bảng này mang tính chất tổng hợp các chỉ báo và cách đo tiêu biểu được ghi nhận, không phải danh mục chỉ báo chuẩn hóa. Nhóm "Các thành phần tổng hợp/liên ngành" không được đưa vào bảng này vì các thành phần trong nhóm được hình thành từ sự kết hợp của các nhóm thành phần khác

Bảng 4, cho thấy một thành phần có thể được cụ thể hóa bằng nhiều chỉ báo và được đo bằng nhiều phương thức khác nhau. Vì vậy, lựa chọn thành phần và chỉ báo cần xuất phát từ cách khái niệm hóa, logic đánh giá và mục tiêu đánh giá, thay vì bắt đầu từ một danh sách chỉ báo có sẵn.

3.3. Diễn giải kết quả đo chất lượng không gian

Các kết quả cho thấy giá trị của một chỉ báo không tự động đồng nghĩa với chất lượng không gian cao hay thấp; ý nghĩa của nó phụ thuộc vào hướng tác động và dạng quan hệ với kết quả chất lượng. Chẳng hạn, chiều cao công trình lớn có quan hệ nghịch với cảm nhận về độ thông thoáng, trong khi khả năng nhìn thấy bầu trời cao có quan hệ thuận với cảm nhận này [8]. Vì vậy, không thể diễn giải giá trị chỉ báo nếu chưa xác định nó liên hệ với chất lượng không gian theo hướng tác động nào.

Diện tích không gian có thể tạo ra tác động khác nhau khi tăng từ quá nhỏ đến phù hợp và quá lớn [13]. Tương tự, tỷ lệ vỉa hè có quan hệ thuận với cảm nhận an toàn, nhưng mức độ cải thiện cảm nhận an toàn không tăng đều khi tỷ lệ vỉa hè tăng; tác động của cây xanh cũng có thể thay đổi khi tỷ lệ tăng quá cao [2].

Bên cạnh đó, bối cảnh áp dụng có thể làm thay đổi ý nghĩa của chỉ báo; sự đầy đủ của không gian ngoài trời được đánh giá khác nhau giữa các khu dân cư do khác biệt về tổ chức không gian, quản lý và mức độ sử dụng [6]. Do đó, diễn giải chất lượng không gian cần đồng thời xác định chỉ báo phản ánh đặc điểm, quan hệ theo dạng và hướng tác động nào, và trong điều kiện nào quan hệ đó có hiệu lực. Nếu thiếu các thông tin này, giá trị đo chỉ phản ánh trạng thái của thuộc tính hoặc mức đánh giá, chưa đủ để kết luận về chất lượng không gian. Điều này cho thấy tính nhất quán của hệ thống đánh giá phải được duy trì từ cách xác định chất lượng không gian, cơ sở đánh giá, thành phần, chỉ báo và cách đo đến diễn giải kết quả.

3.4. Quy trình định hướng thiết lập hệ thống đánh giá chất lượng không gian

Sự không nhất quán trong đánh giá chất lượng không gian có thể xuất hiện ở những nội dung khác nhau. Vì vậy, hệ thống đánh giá cần duy trì sự liên kết và khả năng truy nguyên giữa các nội dung. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất quy trình sáu 6 nhằm thiết lập và kiểm tra tính nhất quán của hệ thống đánh giá như Bảng 5.

Bảng 5. Quy trình định hướng thiết lập hệ thống đánh giá chất lượng không gian

Bước	Nội dung	Câu hỏi trung tâm	Kết quả cần đạt
1. Khái niệm hóa	Xác định chất lượng không gian được hiểu như thế nào	Chất lượng không gian là gì?	Xác định cách khái niệm hóa
2. Logic đánh giá	Xác định cơ sở để đánh giá chất lượng	Dựa vào đâu để kết luận một không gian có chất lượng?	Xác định logic đánh giá
3. Thành phần đo lường	Xác định những khía cạnh cần xem xét	Cần đánh giá những khía cạnh nào?	Xác định các thành phần cần đo
4. Chỉ báo	Lựa chọn chỉ báo đại diện cho từng thành phần	Chỉ báo nào phù hợp để thể hiện các thành phần đó?	Xác định tập chỉ báo
5. Cách đo lường	Xác định phương thức và nguồn dữ liệu	Các chỉ báo được đo bằng cách nào?	Xác định cách đo và bằng chứng cần thu thập
6. Diễn giải mối quan hệ	Xác định cách giá trị chỉ báo liên hệ với chất lượng không gian	Giá trị của chỉ báo được diễn giải như thế nào?	Xác định chiều, ngưỡng, tính phi tuyến hoặc các quan hệ khác nếu có bằng chứng

Các nghiên cứu có thể sử dụng những thành phần và chỉ báo tương tự nhưng xuất phát từ các cách khái niệm hóa, logic đánh giá hoặc phương thức đo khác nhau; do đó, việc lựa chọn chỉ báo riêng lẻ không đủ để bảo đảm rằng kết quả đo phản ánh đúng khái niệm chất lượng không gian ban đầu. Quy trình sáu bước giải quyết khoảng trống này bằng cách đặt từng quyết định đo lường trong quan hệ với quyết định ở bước trước và bước sau: khái niệm hóa định hướng logic đánh giá; logic đánh giá định hướng lựa chọn thành phần; thành phần định hướng chỉ báo; chỉ báo được gắn với phương pháp và dữ liệu đo phù hợp. Vì vậy, đóng góp của quy trình không nằm ở việc đề xuất các thành phần hoàn toàn mới của một hệ thống đánh giá, mà ở việc xác lập một chuỗi liên kết nhất quán

từ khái niệm hóa đến diễn giải kết quả**.**Trong tập tài liệu, logic đánh giá kết hợp không gian vật lý và phản ứng của con người chiếm tỷ trọng cao nhất (14/34). Các nghiên cứu sử dụng logic này thường xem xét đồng thời đặc điểm không gian, khả năng đáp ứng hoạt động và phản ứng của người sử dụng. Trong đó, đặc điểm không gian phản ánh các điều kiện vật chất, khả năng đáp ứng hoạt động phản ánh mức độ không gian hỗ trợ việc sử dụng, còn phản ứng của người sử dụng thể hiện chất lượng được cảm nhận và trải nghiệm. Vì vậy, đánh giá đồng thời nhiều mặt cho phép nhận diện Chất lượng không gian đầy đủ hơn so với chỉ tập trung vào một mặt riêng lẻ. Trên cơ sở đó, nghiên cứu khuyến nghị xem xét cùng lúc các mặt cấu trúc và hình thái, hiệu quả công năng và sử dụng không gian, cảm nhận và trải nghiệm con người khi xây dựng hệ thống đánh giá, đồng thời điều chỉnh thành phần, chỉ báo và phương thức đo theo mục tiêu và bối cảnh cụ thể.

Để minh họa, có thể vận dụng quy trình 06 bước cho mục tiêu đánh giá phục vụ quản lý đô thị, giả sử chất lượng không gian được đánh giá qua ba mặt không gian, công năng, và con người. Từ đó, logic đánh giá được xác định theo hướng kết hợp không gian vật lý và phản ứng của con người; ba nhóm thành phần tương ứng gồm cấu trúc và hình thái không gian, hiệu quả công năng và sử dụng không gian, và cảm nhận và trải nghiệm con người. Các thành phần này có thể được cụ thể hóa bằng các chỉ báo như mật độ xây dựng, tỷ lệ chiều cao công trình/chiều rộng đường, kết nối và tích hợp; mức độ sử dụng, cường độ hoạt động và khả năng thực hiện chức năng; sự hài lòng, cảm nhận an toàn và thoải mái. Các chỉ báo có thể được đo bằng đo đạc hình học và GIS, quan sát hoạt động, khảo sát và thang đánh giá, trước khi xác định chiều, dạng và điều kiện của mối quan hệ với chất lượng không gian.

Minh họa cho thấy khuyến nghị đánh giá trên 03 mặt có thể được triển khai xuyên suốt quy trình 06 bước, từ khái niệm hóa đến diễn giải kết quả. Tuy nhiên, đây là định hướng xây dựng hệ thống đánh giá, không phải bộ thành phần và chỉ báo chuẩn hóa. Đối với thực tiễn đánh giá chất lượng không gian tại Việt Nam, kết quả tổng hợp gợi ý rằng việc xây dựng hoặc lựa chọn bộ tiêu chí không nên chỉ tập trung vào việc bổ sung các chỉ báo, mà cần bảo đảm sự nhất quán giữa cách khái niệm hóa chất lượng không gian, logic đánh giá, thành phần, chỉ báo và phương pháp đo lường. Cách tiếp cận này có thể hỗ trợ cho phép các cơ quan quản lý và đơn vị tư vấn lựa chọn hoặc điều chỉnh bộ tiêu chí phù hợp với mục tiêu và bối cảnh cụ thể của từng khu ở hoặc dự án. Theo đó, quy trình sáu bước có thể được sử dụng như một khung kiểm tra trước khi áp dụng kết quả đánh giá vào quyết định quản lý hoặc thiết kế. Quy trình được xây dựng từ tổng hợp 34 nghiên cứu và chưa được kiểm chứng qua các trường hợp ứng dụng độc lập; vì vậy, việc lựa chọn và vận dụng cụ thể cần được điều chỉnh theo mục tiêu và bối cảnh đánh giá.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu cho thấy sự khác biệt ở nhiều nội dung trong quá trình đánh giá Chất lượng không gian, từ cách hiểu chất lượng không gian là gì cho đến cách đo lường như thế nào. Bằng chứng là 04 nhóm khái niệm, 05 logic đánh giá, 127 thành phần đo và 570 chỉ báo được ghi nhận. Nghiên cứu cũng cho thấy cùng một nội dung có thể được cụ thể hóa và đo lường theo những cách khác nhau; đồng thời, giá trị của chỉ báo không tự xác định chất lượng không gian. Vì vậy, đánh giá chất lượng không gian cần được xem như một chuỗi liên kết từ khái niệm hóa, logic đánh giá, thành phần, chỉ báo và đo lường đến diễn giải kết quả.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất quy trình định hướng 06 bước nhằm hỗ trợ xây dựng và kiểm tra tính nhất quán của hệ thống đánh giá. Quy trình không nhằm xác lập một bộ chỉ báo chuẩn hóa cho mọi bối cảnh, mà giúp lựa chọn thành phần, chỉ báo và phương thức đo phù hợp với mục tiêu đánh giá, đồng thời kiểm tra mối liên hệ giữa bằng chứng đo lường và kết luận về chất lượng không gian.

Kiến nghị: Khi xây dựng hệ thống đánh giá, cần xác định cách khái niệm hóa và logic đánh giá trước khi lựa chọn thành phần và chỉ báo, đồng thời xác định cách đo và cơ sở diễn giải trước khi sử dụng kết quả để kết luận về chất lượng. Cơ quan quản lý đô thị và đơn vị tư vấn thiết kế có thể vận dụng quy trình 06 bước để xây dựng hoặc rà soát bộ tiêu chí đánh giá khu ở và đô thị mới, bảo đảm sự phù hợp giữa tiêu chí, mục tiêu và bối cảnh của từng dự án**.** Việc giới hạn tìm kiếm trên Dimensions.ai giúp duy trì tính nhất quán của chiến lược tìm kiếm và sàng lọc, nhưng có thể bỏ sót một số nghiên cứu công bố trong nước chưa được lập chỉ mục trên cơ sở dữ liệu này; đây là một giới hạn nhỏ của nghiên cứu. Quy trình cần được tiếp tục thử nghiệm trong các bối cảnh khác nhau để đánh giá tính khả thi và khả năng áp dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. Acre and A. Wyckmans. Spatial quality determinants for residential building renovation: A methodological approach to the development of spatial quality assessment. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, vol. 5, no. 3, pp. 183-204, 2014, doi: 10.1080/2093761X.2014.923793.

[2] P. Nowakowski. Adapting Polish apartments to the needs of older people. Medycyna Pracy, vol. 76, no. 4, pp. 269-276, 2025, doi: 10.13075/mp.5893.01639.

[3] F. Acre and A. Wyckmans. Dwelling renovation and spatial quality: The impact of the dwelling renovation on spatial quality determinants. International Journal of Sustainable Built Environment, vol. 4, no. 1, pp. 12-41, 2015, doi: 10.1016/j.ijsbe.2015.02.001.

[4] H. H. B. M. Mohidin, A. M. R. Aminuddin, A. M. A. Aini, and A. S. A. Suryadi. Space syntax as a method to improve the space quality of future low-income housing (L-iH) in Malaysia. Journal of Design and Built Environment, vol. 22, no. 3, pp. 88-98, 2022, doi: 10.22452/jdbe.vol22no3.6.

[5] J. Xie. Intelligent assessment and diagnosis of street space quality using visual transformers. Discover Artificial Intelligence, vol. 6, Art. 696, 2026, doi: 10.1007/s44163-026-01409-7.

[6] G. Cui, M. Wang, Y. Fan, F. Xue and H. Chen. Assessment of health-oriented layout and perceived density in high-density public residential areas: A case study of Shenzhen. Buildings, vol. 14, no. 11, Art. 3626, 2024, doi: 10.3390/buildings14113626.

[7] H. Sadikoglu Asan and A. Ozsoy. The importance of user memory in understanding housing quality. International Journal of Building Pathology and Adaptation, vol. 36, no. 4, pp. 427-446, 2018, doi: 10.1108/IJBPA-02-2018-0017.

[8] Z. Guo, H. Xu, Q. Lin and X. Li. Deep learning assessment of street spatial quality in old residential communities of Wuchang, Wuhan, China. Scientific Reports, vol. 15, Art. 45176, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-28936-0.

[9] A. Ozsoy, N. E. Altas, V. Ok, and G. Pulat. Quality assessment model for housing: A case study on outdoor spaces in Istanbul. Habitat International, vol. 20, no. 2, pp. 163-173, 1996, doi: 10.1016/0197-3975(95)00045-3.

[10] B. M. Tibesigwa, L. Hao and B. V. Karumuna. The concept of spatial quality and its challenges on exercised affordable housing design typology in Dar es Salaam-Tanzania. Habitat International, vol. 59, pp. 44-59, 2017, doi: 10.1016/j.habitatint.2016.11.010.

[11] C. Wu, N. Peng, X. Ma, S. Li, and J. Rao. Assessing multiscale visual appearance characteristics of neighbourhoods using geographically weighted principal component analysis in Shenzhen, China. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 84, Art. 101547, 2020, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101547.

[12] Q. Song, Z. Dou, W. Qiu, W. Li, J. Wang, J. van Ameijde, and D. Luo. The evaluation of urban spatial quality and utility trade-offs for post-COVID working preferences: A case study of Hong Kong. Architectural Intelligence, vol. 2, no. 1, Art. 1, 2023, doi: 10.1007/s44223-022-00020-x.

[13] P. Dursun and G. Saglamer. Analysing housing quality: Belerko housing settlement, Trabzon, Turkey. Open House International, vol. 34, no. 4, pp. 46-56, 2009, doi: 10.1108/OHI-04-2009-B0006.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 22/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/10/2026

Điều chỉnh lại đất đai trong tái cấu trúc không gian làng đô thị hóa theo mô hình Micro-center quanh ga đường sắt đô thị: Trường hợp ga Chùa Hà, Hà Nội

Land readjustment for spatial restructuring of urbanized villages through a station-area Micro-center model: The case of chua ha metro station, Hanoi

> TRẦN XUÂN HIẾU[1,*], NGÔ THIỆN TOÀN[2]
[1]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; [*]Email: hieutx@huce.edu.vn
[2]Ban QLDA Đầu tư hạ tầng phường Tương Mai, TP Hà Nội

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá khả năng áp dụng cơ chế điều chỉnh đất đai (Land Readjustment - LRA) nhằm tái cấu trúc khu vực làng trong quá trình đô thị hóa quanh ga Chùa Hà theo mô hình trung tâm vi mô (Micro-centers). Khu vực nghiên cứu có quy mô khoảng 96 ha, với tỷ lệ đất giao thông chỉ chiếm 8,2%; phần lớn các thửa đất ở hiện hữu tiếp cận thông qua hệ thống ngõ hẹp. Trên cơ sở phân tích hiện trạng, khảo sát thửa đất, dữ liệu giá đất và mô phỏng các kịch bản, nghiên cứu so sánh các phương án LRA ngang, LRA dọc, kịch bản rủi ro và phương án lai ghép theo tầng bậc. Tính khả thi của nghiên cứu được xem xét đồng thời qua bảo toàn giá trị tài sản, đồng thuận xã hội, quỹ đất dự trữ và khả năng tiếp cận ga. Kết quả nghiên cứu định hướng lựa chọn mô hình lai ghép: tập trung chuyển đổi quyền đất thành diện tích sàn ở lõi ga, điều chỉnh thửa có chọn lọc tại khu làng hiện hữu và sử dụng giá trị đất tăng thêm để hỗ trợ hạ tầng. Nghiên cứu đề xuất mạng nút Micro-center và cơ chế điều phối cộng đồng. Chỉ tiêu tài chính và đồng thuận cần được kiểm chứng khi lập dự án.

Từ khóa: Điều chỉnh lại đất đai; trung tâm vi mô; làng đô thị hóa; phát triển định hướng giao thông công cộng; ga Chùa Hà.

ABSTRACT

This study examines land readjustment (LRA) as a mechanism for restructuring an urbanized village around Chua Ha metro station through a station-area micro-center model. The approximately 96-hectare study area has a road-land share of 8.2%, while most residential plots are accessed through narrow alleys. Drawing on spatial analysis, plot surveys, official land-price data and scenario modelling, the study compares horizontal and vertical LRA, a risk scenario and a hierarchical hybrid alternative. Feasibility is assessed through asset-value preservation, social consent, reserve-land provision and station accessibility. The preferred hybrid strategy concentrates land-to-floor-rights conversion near the station, selectively replots residential parcels in the existing village and channels land-value gains into local infrastructure. A network of small functional nodes connected by walkable routes is proposed, alongside an intermediary governance arrangement. Financial balances and consent levels are scenario-based estimates rather than verified implementation outcomes; both require further testing before project approval. It further formalizes land-to-floor rights conversion and the linkage between land readjustment and value capture for cross-subsidized infrastructure investment.

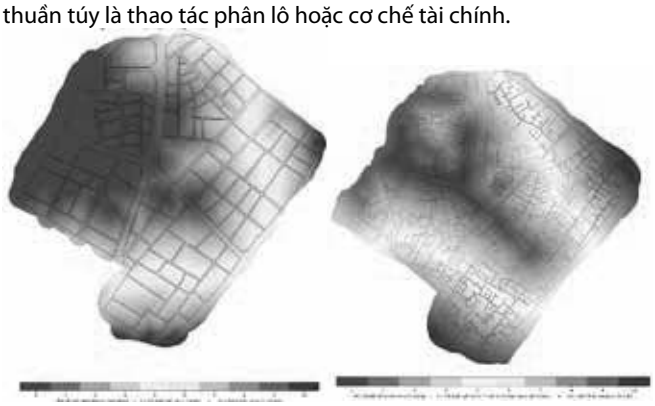
Keywords: Land readjustment; micro-center; urbanized village; transit-oriented development; Chua Ha station.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD) thường đặt nhà ga vào vị trí hạt nhân của cấu trúc đô thị nén, đa chức năng và thuận tiện đi bộ [1, 2]. Tuy nhiên, tại nhiều khu dân cư có nguồn gốc làng xã ở Hà Nội, mạng đường sắt đô thị đi qua một cấu trúc thửa đất đã hình thành dày đặc, ngõ nhỏ và quyền sử dụng đất phân tán. Năng lực vận chuyển của nhà ga vì thế không tự chuyển hóa thành năng lực tiếp cận từ các khu ở lân cận. Đây là sự không tương thích giữa hạ tầng vận tải mới và hình thái cư trú tích lũy lâu dài.

Ga Chùa Hà trên tuyến đường sắt đô thị số 3 là trường hợp có ý nghĩa điển hình: nằm gần các cụm giáo dục, việc làm và thương mại nhưng bị ngăn cách với một bộ phận khu dân cư bởi mạng ngõ hẹp. Đề án thạc sĩ của Ngô Thiện Toàn (2026) xác định phạm vi nghiên cứu khoảng 96 ha, dân số thường trú ước tính 40.000 người, đất giao thông khoảng 8,2% và gần 90% đất ở thuộc nhóm tiếp cận qua ngõ dưới 3,5 m [3]. Những số liệu này cho thấy mở rộng không gian phục vụ ga không thể chỉ dựa vào tăng mật độ công trình quanh lối lên xuống.

Bài báo đặt ra câu hỏi: có thể sử dụng điều chỉnh lại đất đai để đồng thời cải thiện tiếp cận ga, tạo quỹ đất hạ tầng và duy trì cộng đồng cư trú hiện hữu hay không? Đóng góp chính là diễn giải mối liên hệ giữa LRA, thu hồi giá trị đất tăng thêm (LVC) và tổ chức Micro-center như một giải pháp tái cấu trúc không gian, thay vì coi LRA thuần túy là thao tác phân lô hoặc cơ chế tài chính.



Hình 1. Bản đồ nhiệt phản ánh khả năng tiếp cận khu vực với ga Chùa Hà trước và sau khi Mạng lưới giao thông chính mở rộng đạt 18,9 %, tổng diện tích hạ tầng mở rộng đạt trên 20% [3].

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ TIẾP CẬN NGHIÊN CỨU

2.1. Micro-center như một cấp độ tổ chức không gian TOD

Khái niệm Micro-center được vận dụng để chỉ hạt nhân dịch vụ - sinh hoạt quy mô nhỏ có khả năng gắn kết nhà ga với mạng cư trú và các hoạt động thường nhật. Khác với một tổ hợp thương mại tập trung, Micro-center là cấu trúc gồm lõi giao thông và các điểm hoạt động bổ trợ được nối bằng mạng đi bộ liên tục. Quan điểm này kế thừa nguyên tắc mật độ, đa dạng chức năng và thiết kế của TOD [1], đồng thời tiếp cận nhà ga vừa như một nút giao thông, vừa như một nơi chốn đô thị theo mô hình Node-Place [2].

Đối với làng đô thị hóa, điều kiện tiên quyết không chỉ là khoảng cách hình học đến ga mà còn là chiều dài tuyến đi thực tế, tính thông suốt của ngõ phố - đường làng, sự an toàn khi qua đường và khả năng tiếp cận các tiện ích công cộng. Micro-center vì thế được xem như hệ thống các điểm neo chức năng có thứ bậc, không phải một vòng tròn bán kính cứng trên bản đồ.

2.2. LRA, LVC và nguyên tắc phân bổ lợi ích

LRA ngang tập hợp các thửa đất để tổ chức lại ranh giới, trích một phần diện tích cho hạ tầng và quỹ đất dự trữ, sau đó hoàn trả các thửa có hình dạng và khả năng tiếp cận tốt hơn. Kinh nghiệm Nhật Bản cho thấy công cụ này gắn chặt với cơ chế phân chia lại quyền lợi và tổ chức thực hiện [4, 5]. LRA dọc mở rộng logic quy đổi từ đất nền sang quyền đối với diện tích sàn trong công trình mới; đây là một lựa chọn nghiên cứu cho những vị trí có khả năng tăng cường độ sử dụng đất, nhưng cần cơ sở pháp lý và định giá quyền tài sản tương ứng.

LVC hướng tới điều tiết một phần giá trị đất gia tăng do đầu tư hạ tầng và thay đổi khả năng phát triển để tái đầu tư cho dự án [6, 7]. Khi kết hợp LRA với LVC, quỹ đất dự trữ và quyền phát triển có thể tạo nguồn lực mở đường, không gian công cộng và tái định cư tại chỗ. Tuy nhiên, tăng giá trị toàn khu không đồng nghĩa từng hộ đều được bảo toàn tài sản; vì vậy cần kiểm tra đồng thời hiệu quả ở cấp hộ và cấp dự án.

2.3. Dữ liệu, phạm vi và phương pháp

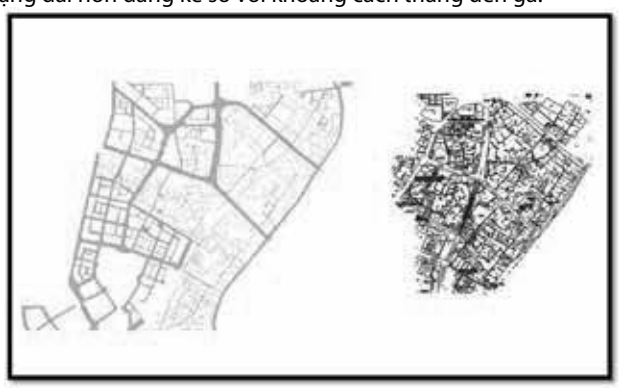
Nghiên cứu kế thừa dữ liệu và các kịch bản của đề án ga Chùa Hà [3], gồm bản đồ quy hoạch phân khu H2-1, H2-2, phân lớp GIS và ảnh vệ tinh, quan sát thực địa, khảo sát 696 thửa đất được trình bày trong nghiên cứu, cùng dữ liệu giá đất theo Nghị quyết 52/2025/NQ-HĐND [8]. Các lớp dữ liệu được sử dụng để nhận diện nhóm đất theo vị trí tiếp cận, đánh giá mạng đường và phân vùng can thiệp. Các con số về đồng thuận và giá trị tài sản sau dự án là giả định phục vụ so sánh kịch bản, chưa phải kết quả điều tra chấp thuận hoặc định giá giao dịch.



Hình 2. Ranh giới và cấu trúc hiện trạng khu vực ga Chùa Hà [3]

3. HIỆN TRẠNG VÀ BÀI TOÁN TÁI CẤU TRÚC

Phân tích hiện trạng cho thấy diện tích đất ở chiếm tỷ trọng lớn, trong khi mạng giao thông chủ yếu là các ngõ phân nhánh, liên kết ngang hạn chế. Theo nghiên cứu, diện tích đất giao thông khoảng 7,7 ha; đất cây xanh công cộng rất thấp so với quy mô dân số; các tuyến ngõ nhỏ đồng thời gánh chức năng tiếp cận nhà ở, kinh doanh và đi lại [3]. Cấu trúc "xương cá" khiến khoảng cách đi bộ theo mạng dài hơn đáng kể so với khoảng cách thẳng đến ga.



Hình 3. Mạng đường và phân bố thửa đất đặc trưng của làng đô thị hóa [3]

Sự phân hóa giá đất giữa mặt phố và ngõ sâu tạo ra nghịch lý: các thửa đất nằm gần ga về mặt địa lý nhưng chưa nhận được đầy đủ lợi ích tiếp cận. Trong khi đó, việc giải phóng mặt bằng diện rộng có nguy cơ làm gián đoạn sinh kế, thay đổi cấu trúc cộng đồng và phát sinh chi phí xã hội. Bài toán quy hoạch vì vậy là tạo được mạng tiếp cận mới mà không đồng nhất tái cấu trúc với thay thế toàn bộ khu ở hiện hữu.

4. KỊCH BẢN ĐIỀU CHỈNH ĐẤT ĐAI VÀ ĐÁNH GIÁ KHẢ THI

4.1. Phân nhóm đối tượng và nguyên tắc quy đổi

Bài báo sử dụng vị trí đất VT1-VT4 và diện tích sau đóng góp để phân nhóm: nhóm A gồm thửa có lợi thế tiếp cận cần hạn chế xáo

trộn; nhóm B gồm các thửa trong ngõ có khả năng nhận lại đất nền sau sắp xếp; nhóm C gồm thửa nhỏ cần cân nhắc chuyển đổi sang diện tích sàn; nhóm D là quỹ đất dự trữ cho hạ tầng và khai thác giá trị gia tăng. Với tỷ lệ góp đất d, diện tích hoàn trả sơ bộ cho hộ i là $E_i = A_i(1 - d)$, trong đó A_i là diện tích ban đầu. Ngưỡng $E_i = 30$ m² được dùng như một tiêu chí sàng lọc trong mô hình, không nên hiểu là quy định pháp lý phổ quát cho mọi thửa đất.

Ở cấp hộ, hệ số bảo toàn giá trị được mô tả bằng $Pr_h = (1 - d)y$, với y là tỷ số đơn giá đất sau và trước điều chỉnh. Chẳng hạn d = 30% thì cần $y \geq 1{,}43$ để giá trị danh nghĩa không giảm; nếu đặt mục tiêu $Pr_h \geq 1{,}2$ thì $y \geq 1{,}71$. Kết quả này cho thấy hiệu quả của LRA ngang phụ thuộc mạnh vào khả năng nâng cấp điều kiện tiếp cận và phương pháp định giá đất sau tái phân lô. Các hệ số chưa phản ánh đầy đủ chi phí giao dịch, thời gian triển khai và biến động thị trường.

4.2. Cơ chế liên kết LRA ngang - LRA dọc - LVC và phân bổ quyền lợi

Đối với LRA ngang, hộ i có diện tích đất ban đầu A_i, tỷ lệ đóng góp d_i và đơn giá trước/sau là a_i, e_i. Diện tích hoàn trả $E_i = A_i(1 - d_i)$; hệ số bảo toàn giá trị tài sản $Pr_i,H = (E_ie_i)/(A_ia_i) = (1 - d_i)y_i$, trong đó $y_i = e_i/a_i$. $Pr_i,H \geq 1$ là điều kiện không giảm giá trị danh nghĩa; ngưỡng cao hơn có thể được đặt ra để bù rủi ro và chi phí chuyển đổi.

Đối với LRA dọc, quyền lợi được quy đổi từ đất nền sang diện tích sàn. Theo nguyên tắc phân bổ theo tỷ trọng giá trị đóng góp [3], diện tích sàn hoàn trả cho hộ i được viết lại dưới dạng:

$$F_i = (1 - s) \times GFA_p \times (A_ia_i / \Sigma_{j \in C} A_ja_j) \quad (1)$$

Trong đó C là tập hộ chuyển đổi dọc; s là phần diện tích sàn dành cho hoàn vốn/kinh doanh; GFA_p là tổng sàn thuộc phạm vi phân bổ; a_i là đơn giá đất ban đầu. Khi đơn giá sàn hoàn thiện của hộ i là p_i, hệ số bảo toàn tài sản cấp hộ là $Pr_i,V = F_ip_i/(A_ia_i)$. Cách tính này tránh đồng nhất mét vuông đất với mét vuông sàn; các hệ số hiệu dụng sàn, chi phí xây dựng và quyền sở hữu chung phải được xác lập khi lập dự án.

Với LRA lai ghép, giá trị tạo lập gồm ba dòng: (i) đất hoàn trả theo chiều ngang $V_H = \Sigma_{i \in H} E_ie_i$; (ii) sàn hoàn trả theo chiều dọc $V_V = \Sigma_{i \in C} F_ip_i$; (iii) quỹ đất dự trữ $V_R = R \times p_R$. Khi $V_0 = \Sigma_i A_ia_i$ là giá trị đất gốc, chỉ số tổng hợp ở cấp dự án có thể biểu diễn:

$$Pr_dự\ án = (V_H + V_V + V_R) / V_0 \quad (2)$$

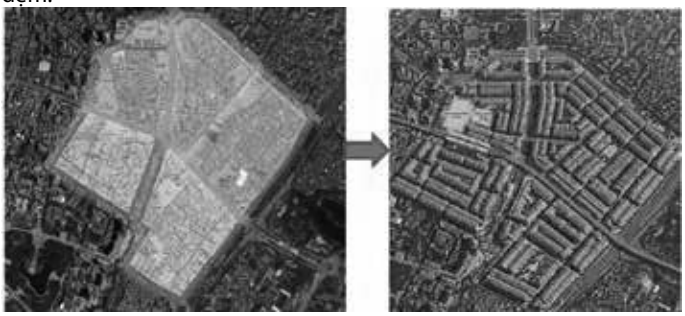
Biểu thức (2) hệ thống hóa cách gộp các dòng giá trị ở kịch bản 4 [3], không đồng nghĩa với lợi nhuận ròng hoặc bảo đảm quyền lợi cho từng hộ. Quỹ đất dự trữ R được xác định sau khi trừ đất hoàn trả, đất hạ tầng và các chức năng giữ lại; giá trị V_R là tiềm năng thu hồi giá trị đất (LVC), không phải tiền mặt chắc chắn thu được.

Liên kết tài chính giữa hai hình thức LRA và LVC có thể kiểm định bằng điều kiện $B_LVC + B_khác \geq C_hạ\ tầng + C_tái\ định\ cư + C_chuyển\ đổi + C_quản\ lý$. Đây là biểu thức cân đối đề xuất để làm rõ cơ chế trợ cấp chéo, không phải kết quả đã được kiểm toán. Nguồn thu từ quỹ đất và quyền phát triển tại lõi ga được phân bổ trở lại cho mở đường, tái định cư tại chỗ và không gian công cộng trong vùng làng đô thị; cần tránh tính trùng giá trị đất dự trữ với giá trị sàn đã hoàn trả.

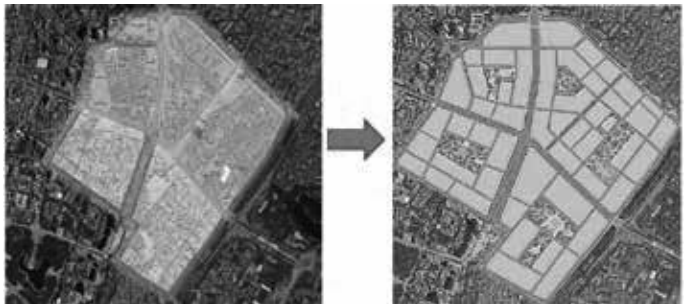
Về tổ chức không gian, cơ chế này vận hành theo chu trình: phân loại thửa và quyền tài sản → LRA ngang tại vùng đệm / LRA dọc có chọn lọc tại lõi ga → hình thành đất dự trữ và quyền phát triển → LVC và điều tiết chéo → đầu tư mạng đi bộ, hạ tầng và các nút Micro-center. Chu trình phản ánh quan hệ ngang giữa các thửa, quan hệ dọc giữa đất và sàn, đồng thời liên kết tài chính giữa vùng hưởng lợi cao và vùng cần cải tạo.

4.3. Bốn kịch bản nghiên cứu

Bài báo xây dựng bốn kịch bản với vai trò khác nhau [3]. Kịch bản 1 (LRA ngang) ưu tiên duy trì nhà ở bám đất, tổ chức lại thửa và mở rộng ngõ. Kịch bản 2 (LRA dọc toàn phần) chuyển đổi phần lớn đất ở thành tổ hợp cao tầng, tạo mặt bằng và quỹ đất dự trữ lớn nhưng gây xáo trộn hình thức cư trú. Kịch bản 3 không phải phương án bố trí không gian độc lập, mà là phép thử đổ vỡ khi giá đất, đồng thuận hoặc điều kiện pháp lý bất lợi. Kịch bản 4 kết hợp LRA ngang tại khu làng hiện hữu và LRA dọc có chọn lọc ở lõi ga, dùng nguồn lực tạo ra tại vị trí có giá trị cao để hỗ trợ cải thiện mạng hạ tầng trong vùng đệm.



Hình 4. Nguyên lý điều chỉnh thửa đất theo LRA ngang [3]



Hình 5. Nguyên lý chuyển đổi không gian trong kịch bản LRA lai ghép tầng bậc [3]

4.4. Đánh giá tổng hợp và độ nhạy

Khung đánh giá sử dụng bốn biến: Pr - bảo toàn/gia tăng giá trị tài sản; S - mức đồng thuận xã hội; R - quỹ đất dự trữ; M - cải thiện tiếp cận nhà ga. Sau chuẩn hóa về khoảng (0; 1), chỉ số tổng hợp $F = (Pr_n \times S_n \times R_n \times M_n)^{\wedge}(1/4)$. Trung bình nhân hạn chế khả năng dùng một chỉ tiêu cao để bù hoàn toàn cho một chỉ tiêu không đạt ngưỡng. F là công cụ xếp hạng tương đối trong tập kịch bản và phụ thuộc trực tiếp vào giả định chuẩn hóa; không phải xác suất dự án thành công.

Trong nghiên cứu này, biến đồng thuận được ước tính theo $S = S_max - \beta D$, với D là tỷ lệ phải thay đổi hình thức cư trú; đây là giả định kịch bản, chưa phải kết quả điều tra ý kiến hộ dân.

Vì vậy, kết quả có thể khẳng định ở mức độ tin cậy của mô phỏng là phương án lai ghép được xếp cao nhất, không coi trị số F là một thông số đã kiểm chứng thực nghiệm.

Chỉ tiêu so sánh	LRA ngang	LRA dọc toàn phần	LRA lai ghép
Tổ chức cư trú	Duy trì đất nền	Chuyển phần lớn sang sàn	Phân vùng theo điều kiện thửa
Quỹ đất cho hạ tầng	Có, phân tán	Lớn, tập trung	Kết hợp quỹ lõi và vùng đệm
Rủi ro chính	Giá đất mới không đủ bù góp đất	Chi phí và xáo trộn cộng đồng	Phức tạp quy đổi quyền, điều phối
Đánh giá định tính	Bảo tồn tốt, hạn chế nguồn lực	Hiệu quả không gian cao, rủi ro xã hội lớn	Cân bằng tương đối các mục tiêu

Đối với phương án lai ghép, các tính toán của nghiên cứu định hướng tỷ lệ đất giao thông tăng từ 8,2% lên xấp xỉ 20%, mở rộng phạm vi tiếp cận đi bộ hữu hiệu từ khoảng 200 - 300 m lên mức mục tiêu khoảng 800 m [3]. Đây là chỉ tiêu sau can thiệp theo kịch bản, không phải thay đổi đã xảy ra tại hiện trường. Để chuyển từ kết quả sơ bộ sang luận cứ đầu tư, cần mô phỏng tuyến đi bộ trên mạng

thực, kiểm định thời gian di chuyển và phân tích lưu lượng qua từng lối ra vào ga.

5. CẤU TRÚC MICRO-CENTER VÀ CƠ CHẾ THỰC HIỆN

5.1. Từ lõi ga đến mạng các trung tâm vi mô

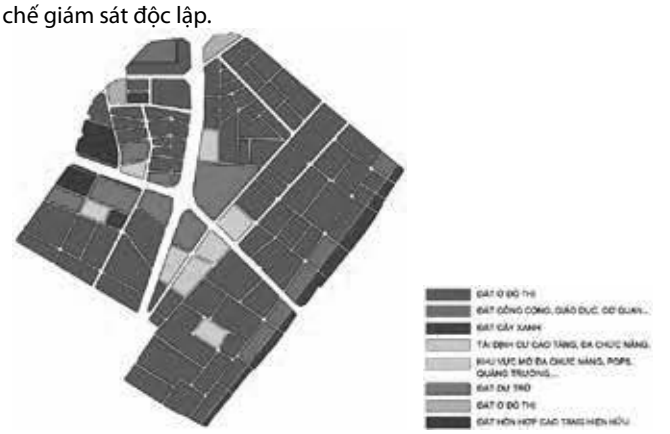
Giải pháp không gian không đặt toàn bộ hoạt động vào một tổ hợp cao tầng. Lõi MC-0 được tổ chức tại ga, tích hợp trung chuyển, quảng trường tiếp cận, dịch vụ và kết nối trực tiếp với công trình lân cận. Các nút vệ tinh gồm MC-1 gắn với không gian văn hóa Đình - Chùa Hà; MC-2 gắn với thương mại dân sinh và dịch vụ cộng đồng; MC-3 hướng về hành lang cảnh quan sông Tô Lịch. Hệ thống này tạo một mạng điểm đến phân tán, phù hợp với cường độ hoạt động và bản sắc của khu vực làng đô thị hóa.

Về mặt hình thái, ba lớp không gian được đề xuất: vùng lõi gần ga ưu tiên LRA dọc có chọn lọc và tổ hợp hỗn hợp; vùng làng đô thị áp dụng LRA ngang để cải thiện ngõ và duy trì cấu trúc nhà ở - kinh doanh; vùng chuyển tiếp bố trí tuyến đi bộ, cây xanh và các điểm nghỉ. Hành lang đi bộ liên tục đóng vai trò kết nối các lớp này. Cần phân biệt bán kính tiếp cận theo mạng với vòng tròn khoảng cách trên mặt bằng; chất lượng tiếp cận phụ thuộc vào số điểm giao cắt, độ rộng, tính an toàn và khả năng sử dụng cho mọi nhóm người.

5.2. Quỹ đất dự trữ và tổ chức quản trị

Theo logic LRA-LVC, một phần quỹ đất sau điều chỉnh được giữ lại làm đất dự trữ để khai thác nguồn thu cho hạ tầng, tái định cư và không gian công cộng. Bài báo đề xuất tổ chức quản lý trung gian (KVM) có sự tham gia của chính quyền, cộng đồng và nhà đầu tư, đảm nhận điều phối quy đổi quyền, phân bổ lợi ích và duy tu các không gian sử dụng chung [3]. Đây là mô hình thể chế đề xuất, chưa phải loại hình pháp nhân đã có quy trình áp dụng thống nhất tại Việt Nam.

Cơ chế triển khai cần dựa trên kiểm kê pháp lý từng thửa, định giá độc lập, công khai phương án hoàn trả, lấy ý kiến cư dân và giải quyết khiếu nại trước khi thực hiện. Điều 219 Luật Đất đai 2024 đặt cơ sở pháp lý cho việc góp quyền sử dụng đất, điều chỉnh lại đất đai [9]; tuy nhiên, chuyển đổi quyền từ đất nền sang diện tích sàn và phân chia dòng thu dài hạn vẫn đòi hỏi hướng dẫn và thiết kế hợp đồng cụ thể. Việc thí điểm chỉ nên được xem xét sau khi làm rõ quyền lợi nhóm hộ dễ bị tổn thương, trách nhiệm tài chính và cơ chế giám sát độc lập.



Hình 6. Bản đồ kế hoạch sử dụng đất sau tái cấu trúc không gian khu vực theo phương án lai ghép đạt mức độ tổng hợp tương thích cao nhất trên các phương diện đánh giá tài chính (Pr), xã hội (S) và không gian - cảnh quan (R) [3]

6. THẢO LUẬN VÀ KẾT LUẬN

Điểm có giá trị của cách tiếp cận là chuyển đơn vị phân tích từ "ô đất quanh ga" sang hệ quan hệ giữa quyền sử dụng đất, mạng tiếp cận và các điểm hoạt động xã hội. Điều chỉnh lại đất đai vì vậy được xem như công cụ tổ chức lại cấu trúc không gian và phân phối lợi ích của TOD. Mô hình lai ghép giúp tránh hai cực đoan: chỉ mở ngõ và phân lô lại nhưng thiếu nguồn lực; hoặc tái thiết cao tầng đồng loạt làm đứt gãy cấu trúc cư trú hiện hữu.

Giới hạn nghiên cứu cần được nhận diện rõ. Thứ nhất, mức đồng thuận là biến giả định theo kịch bản, chưa có điều tra xã hội học đại diện. Thứ hai, tính toán giá trị đất dựa trên bảng giá và hệ số mô phỏng, chưa thay thế thẩm định giá thị trường, dòng tiền chiết khấu hoặc tổng mức đầu tư đầy đủ. Thứ ba, các mục tiêu tiếp cận ga và chỉ tiêu hạ tầng cần được kiểm chứng bằng bản đồ mạng và hồ sơ thiết kế kỹ thuật. Thứ tư, diện tích cây xanh công cộng trong phương án lai ghép còn hạn chế, cần cân nhắc điều chỉnh cơ cấu đất dự trữ để tăng không gian mở.

Từ trường hợp ga Chùa Hà có thể rút ra ba kết luận. (i) Phát triển Micro-center trên cấu trúc làng đô thị hóa đòi hỏi cải thiện mạng tiếp cận, không chỉ tăng mật độ quanh ga. (ii) LRA lai ghép, kết hợp LVC và phân vùng theo điều kiện thửa đất, là hướng tiếp cận có triển vọng cân bằng nguồn lực đầu tư với duy trì cộng đồng. (iii) Chỉ số khả thi tổng hợp hữu ích ở giai đoạn lựa chọn kịch bản nhưng cần kiểm định bằng dữ liệu thị trường, khảo sát cư dân và đánh giá tác động giao thông trước khi sử dụng cho quyết định đầu tư. Hướng nghiên cứu tiếp theo là xây dựng bộ dữ liệu thửa đất - hộ gia đình, mô phỏng mạng đi bộ đa phương thức và thử nghiệm cơ chế phân bổ lợi ích tại một tiểu khu quanh ga.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Calthorpe, P. The Next American Metropolis: Ecology, Community and the American Dream. Princeton Architectural Press, 1993.

[2] Bertolini, L. Spatial development patterns and public transport: The application of an analytical model in the Netherlands. Planning Practice & Research, vol. 14, no. 2, pp. 199-210, 1999.

[3] Ngô Thiện Toàn. Đề án phát triển không gian khu vực ga Chùa Hà theo định hướng Micro-center. Đề án thạc sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2026.

[4] Doebele, W. A. (Ed.). Land Readjustment: A Different Approach to Financing Urbanization. Lexington Books, 1982.

[5] Sorensen, A. Land readjustment and metropolitan growth: An examination of suburban land development and urban sprawl in the Tokyo metropolitan area. Progress in Planning, vol. 53, no. 4, pp. 217-330, 2000.

[6] Hong, Y.-H. & Needham, B. (Eds.). Analyzing Land Readjustment: Economics, Law, and Collective Action. Lincoln Institute of Land Policy, 2007.

[7] Suzuki, H., Murakami, J., Hong, Y.-H. & Tamayose, B. Financing Transit-Oriented Development with Land Values. World Bank, 2015.

[8] Hội đồng nhân dân TP Hà Nội. Nghị quyết số 52/2025/NQ-HĐND về việc quy định bảng giá đất lần đầu để công bố và áp dụng từ ngày 01/01/2026 trên địa bàn TP Hà Nội, ngày 26/11/2025.

[9] Quốc hội. Luật Đất đai số 31/2024/QH15, ngày 18/01/2024.

■Ngày nhận bài: 28/9/2026 ■Ngày sửa bài: 08/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 16/10/2026

Chiến lược phát triển không gian đô thị logistics Bình Khánh, Cần Giờ: Tham chiếu mô hình "Chiến lược 10 + X" tại Lingang, Thượng Hải (Trung Quốc)

Spatial development strategy for binh khanh logistics Urban Area, Can Gio: Drawing on the "10 + X" Model of Lingang, Shanghai (China)

> ĐINH BÌNH PHƯƠNG MINH[1,*], LÊ ANH ĐỨC[2], PHẠM NGỌC TUẤN[1]
[1]Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM; [*]Email: phuongminhdinh83@gmail.com
[2]Trường Đại học Văn Lang, TP.HCM

TÓM TẮT

Trong bước chuyển trọng tâm "hướng biển" của TP.HCM sau sáp nhập, Bình Khánh - Cần Giờ đứng trước bài toán: dòng chảy hậu cần từ cảng trung chuyển quốc tế Cần Giờ liệu có tạo áp lực lên cấu trúc đô thị vốn có hệ sinh thái nhạy cảm? Liệu những định hướng phát triển của một Khu động lực có là một chiếc áo quá rộng so với tiềm năng và khả năng chống chịu, thích ứng của khu vực? Để tìm một hướng đi bền vững, Khu Thí điểm Thương mại tự do (FTZ) Lingang, Shanghai được lựa chọn như một trường hợp tham chiếu nhờ mô hình phát triển tích hợp giữa cảng - logistics - đô thị mang tính linh hoạt, thích ứng - có nhiều điểm tương đồng với đặc điểm sinh thái và định hướng phát triển của Bình Khánh. Nghiên cứu này, theo đó, hướng tới ba mục tiêu: (1) Phân tích hiện trạng và nhận diện các vấn đề cốt lõi trong cấu trúc không gian đô thị Bình Khánh, (2) Đúc kết bài học kinh nghiệm từ "Chiến lược 10 + X" từ khu FTZ Lingang để xác lập các phân vùng không gian chính với các biến số linh hoạt; (3) Đề xuất các chiến lược phát triển không gian đô thị logistics Bình Khánh. Kết quả nghiên cứu định hình một khung cấu trúc không gian chiến lược cùng với các chính sách phát triển giúp Bình Khánh trở thành cửa ngõ hậu cần quan trọng của TP.HCM nhưng vẫn giữ được bản sắc sinh thái, hiện thực hóa mô hình Kinh tế Xanh lam cho Cần Giờ.

Từ khóa: Chiến lược 10+X; đô thị Logistics Bình Khánh; FTZ Lingang New Area; Kinh tế Xanh lam.

ABSTRACT

In Ho Chi Minh City's strategic expansion toward the sea, Binh Khanh stands at a paradox: Will the logistical flows from the Can Gio International Transshipment Port overwhelm an urban structure rooted in a sensitive ecosystem? Are the development orientations of a Dynamic Growth Hub too grand a mantle for the area's inherent potential and adaptive capacity? To chart a sustainable path, the Lingang Special Area of the Shanghai Free Trade Zone (SFTZ) was selected as a primary reference case. Lingang's integrated model of port-logistics-urban development-characterized by flexibility and adaptability-shares significant strategic and ecological parallels with Binh Khanh. Accordingly, this research pursues three objectives: (1) Analyzing the current status and identifying the core issues within Binh Khanh's urban spatial structure; (2) Deriving lessons from the "10+X Strategy" of the Lingang FTZ to establish deterministic core strategies and flexible variables; and (3) Proposing spatial development strategies for the Binh Khanh City for Logistics based on these international insights. The research findings define a spatial structural framework and development strategies that enable Binh Khanh to become a vital logistics gateway for HCMC while preserving its ecological identity, ultimately realizing the Blue Economy model for Can Gio.

Keywords: 10+X Strategy; Binh Khanh City for logistics; FTZ Lingang New Area; Blue Economy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1. Bối cảnh quốc tế và định hướng quốc gia về phát triển đô thị logistics

Trong kỷ nguyên của chuỗi cung ứng toàn cầu, các đô thị cảng biển đã vượt ra khỏi vai trò là điểm tập kết hàng hóa để chuyển mình thành các đô thị logistics. Theo định nghĩa của Rodrigue: "Một đô thị logistics là một khu vực đô thị mà trong đó, các chức năng logistics và phân phối hàng hóa được đan cài vào cấu trúc đô thị, được ưu tiên như yếu tố cốt lõi thúc đẩy năng lực cạnh tranh kinh tế" [1]. Từ những đô thị cảng điển hình ở châu Âu như Rotterdam, Antwerp (Hà Lan) đến khu cảng Tuas

(Singapore) hay Thượng Hải (Trung Quốc) cho thấy một xu thế tất yếu: tái cấu trúc đô thị xung quanh chuỗi cung ứng để tối ưu hóa giá trị kinh tế biển [2].

Tại TP.HCM, định hướng mở rộng không gian phát triển về phía biển Cần Giờ đã được xác định trong điều chỉnh Quy hoạch chung thành phố đến năm 2040, tầm nhìn 2060 và Nghị quyết 36-NQ/TW ngày 22/10/2018 về Chiến lược phát triển bền vững Kinh tế biển. Với vai trò và vị thế của một trung tâm kinh tế lớn nhất cả nước, mặt tiền biển, cửa biển ra quốc tế của TP.HCM sau sáp nhập, trải dài vùng vịnh Cần Giờ - Gành Rái. Hệ thống các đô thị logistics tại đây hầu hết đều tiếp cận với mạng lưới sông Sài Gòn - Đồng Nai, tạo nên một vòng cung nước hình chữ U với mặt tiền sông dài tới 160 km. Đặc điểm địa hình này cho phép tàu biển tiến sâu và cặp bến trong đất liền, tạo nên một hình thái đô thị logistics gắn với cảng biển [3].

Trong bối cảnh đó, khu vực ven mặt nước như Bình Khánh nổi lên như địa bàn chiến lược để tái cấu trúc không gian đô thị logistics, thí điểm các chính sách mới theo hướng liên vùng và bền vững. Điều này đòi hỏi một tư duy mới về tổ chức không gian: quy hoạch cấu trúc không gian chiến lược nhằm nhận diện và giải quyết các vấn đề cốt lõi của đô thị. Thay vì những điều chỉnh cục bộ, việc định hình khung không gian cấu trúc (theo hướng top-down) là bước tiền đề tạo không gian lưu thông cho dòng chảy hàng hóa, từ đó kiến tạo sự công sinh giữa cảng biển và các thành phố.

1.2. Sự cần thiết phát triển không gian đô thị logistics Bình Khánh

Việc phát triển đô thị logistics gắn với cửa ngõ hàng hải, giao thông đa phương thức trở thành một mũi nhọn trong chiến lược phát triển mới. Bình Khánh hội tụ tiềm năng để phát triển không gian chức năng có tính đặc thù như logistics. Với vị trí nằm ở ngã ba sông Nhà Bè - Lòng Tàu - Soài Rạp, thuận lợi trong giao thương và vận tải hàng hóa bằng đường sông, đường biển. Theo Quyết định 1125/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ, Bình Khánh được định vị là khu vực động lực mới với quỹ đất lên đến 1.000 ha dành cho cảng tiềm năng và hạ tầng logistics. Đây không chỉ là hậu phương chiến lược cho cảng trung chuyển quốc tế Cần Giờ, cụm cảng Cái Mép mà còn là mắt xích trọng yếu kết nối hành lang kinh tế biển. Đặc biệt, với cơ chế đặc thù từ Nghị quyết 260/2025/QH15 của Quốc hội, Bình Khánh có cơ hội thí điểm mô hình Khu thương mại tự do (Free Trade Zone - FTZ), tạo đòn bẩy thu hút dòng vốn và công nghệ logistics toàn cầu.

Chính vì vậy, định hướng quy hoạch đô thị logistics tại Bình Khánh là cần thiết, nhằm phát huy vai trò "điểm nút chiến lược ra biển", đưa Thành phố trở thành trung tâm logistics của vùng trọng điểm phía Nam.

1.3. Sự tương đồng giữa Bình Khánh và Lingang - Cơ sở lựa chọn mô hình tham chiếu

Trong quá trình tìm kiếm một hướng đi bền vững cho Bình Khánh, Lingang New Area được chọn làm trường hợp tham chiếu xuất phát từ những tương đồng sâu sắc về địa kinh tế, hình thái không gian và tầm nhìn chiến lược:

Vị thế cửa ngõ đô thị: Cả hai khu vực đều đóng vai trò tiền tiêu hướng biển, kết nối lõi đô thị trung tâm (Thượng Hải - TP.HCM) với hệ thống cảng nước sâu quốc tế (Dương Sơn – Cần Giờ, Cái Mép). Về hình thái, Lingang và Bình Khánh đều được hình thành trên nền địa chất yếu với mạng lưới sông rạch dày đặc. Cách Lingang sử dụng Hồ Dishui và các hành lang xanh để tạo độ xốp cho đô thị công nghiệp là bài học để Bình Khánh giải quyết bài toán phát triển trên hệ sinh thái ngập mặn.

Sự tương đồng về định hướng phát triển: Nếu Lingang được định vị là động lực tăng trưởng mới của Thượng Hải với các khu vực chức năng chuyên biệt, thì Bình Khánh cũng đã được xác định là khu vực động lực trong điều chỉnh Quy hoạch chung TP.HCM. Sự tương đồng về phân khu logistics quy mô lớn (1.000 ha) giúp "chiến lược 10 + X" của Lingang trở thành một công thức quy hoạch có khả năng ứng dụng cao cho bối cảnh địa phương.

Cơ chế đặc thù và thí điểm chính sách đối với Khu thương mại tự do: Điểm gắn kết quan trọng nhất chính là vai trò Pilot (thí điểm). Lingang là hạt nhân của Khu thí điểm Thương mại tự do Thượng Hải (SFTZ) với những cơ chế vượt trội [4]. Tương tự, với Nghị quyết 260, Bình Khánh đang mang kỳ vọng trở thành nơi thí điểm các mô hình kinh tế mới và Khu thương mại tự do cho TP.HCM. Do đó, tham chiếu "chiến lược 10 + X" của Lingang giúp Bình Khánh có một nền tảng khoa học vững chắc để cụ thể hóa các cơ chế đặc thù thành các không gian chiến lược, hướng đến mục tiêu Kinh tế Xanh lam và bền vững.



Hình 1. Vị trí khu FTZ Lingang New Area trong Shanghai và vị trí Bình Khánh trong TP.HCM sau sáp nhập

2. HIỆN TRẠNG PHÁT TRIỂN KHÔNG GIAN TẠI BÌNH KHÁNH

2.1. Vị trí và liên hệ vùng

Bình Khánh, xã cửa ngõ phía Bắc Cần Giờ, nằm trên trục đường giao thông huyết mạch là đường Rừng Sác, phà Bình Khánh, cầu Bình Khánh, kết nối với đường Huỳnh Tấn Phát đi các phường trung tâm TP.HCM; tiếp giáp với khu đô thị cảng Hiệp Phước về phía Tây và khu đô thị Nhơn Trạch về phía Đông; cao tốc Long Thành - Bến Lức kết nối các dự án hạ tầng trọng điểm quốc gia như Sân bay quốc tế Long Thành, cụm Cảng Thị Vải - Cái Mép và cảng trung chuyển quốc tế Cần Giờ tạo nên các mối liên hệ vùng mạnh mẽ. Về giao thông thủy, Bình Khánh nằm ở ngã ba sông Nhà Bè - Lòng Tàu - Soài Rạp, thuận lợi giao thương và vận tải hàng hóa bằng đường sông, đường biển. Chính nhờ vị trí chiến lược, khu vực là đầu mối trung chuyển hàng hóa từ miền Tây Nam Bộ đến các cụm cảng nước sâu và sân bay quốc tế, tạo động lực để đưa TP.HCM trở thành trung tâm logistics của Vùng kinh tế trọng điểm phía Nam.

2.2. Hiện trạng phát triển không gian

Hiện trạng sử dụng đất tại Bình Khánh phản ánh đặc điểm của một vùng ven biển truyền thống, đang trong quá trình chuyển mình giữa bảo tồn sinh thái và phát triển hạ tầng. Cơ cấu sử dụng đất hiện nay chủ yếu là đất nuôi trồng thủy sản và đất sản xuất nông nghiệp (chiếm khoảng 61,65% diện tích toàn khu), phân bố rộng khắp các khu vực ven sông, đặc biệt là dọc theo sông Lòng Tàu và các rạch nhánh. Khu dân cư tập trung chủ yếu ở phía Bắc, dọc theo tuyến đường Rừng Sác, và phân bố rải rác ven sông, nơi có điều kiện thuận lợi để sinh sống và khai thác thủy sản.

Các hoạt động sinh kế tại địa phương phụ thuộc vào nguồn nước, gồm hoạt động sinh kế trên mặt nước (vận chuyển hàng hóa đường thủy, dịch vụ du lịch ven sông, nuôi trồng đánh bắt thủy sản,…) và hoạt động sinh kế dựa vào nước (làm muối, canh tác nông nghiệp ven sông). Khu vực có tiềm năng phát triển trong thị trường kinh tế biển nhờ vào hệ sinh thái đa dạng, ngành công nghiệp nuôi chim yến do nằm trên đường chim di cư, nuôi trồng thủy sản nhờ vào nguồn nước lợ sẵn có và các ngành kinh tế tri thức xung quanh rừng ngập mặn.

Tuy nhiên, về giao thông và hạ tầng phục vụ logistics hiện hữu trong khu vực tồn tại những điểm yếu: tuyến Cao tốc Long Thành - Bến

Lức - TP.HCM tuy mang tính liên vùng nhưng không kết nối được với khu vực, các tuyến đường chuyên dụng cho vận tải hàng hóa, các không gian chức năng chuyên biệt logistics như kho bãi tập trung, trung tâm phân phối chưa đồng bộ, đang tạo ra khoảng trống lớn giữa hiện trạng và định hướng phát triển.

2.3. Các vấn đề cốt lõi

Từ những đánh giá về hiện trạng và phân tích bối cảnh, nghiên cứu xác định ba vấn đề cốt lõi: (1) Về không gian đô thị và hạ tầng chưa đồng bộ: Dù được quy hoạch là khu động lực phát triển mới, diện mạo đô thị hiện tại chưa phát triển tương xứng, chưa sẵn sàng để dung nạp quy mô dân số lớn và phục vụ lực lượng lao động logistics trong tương lai; (2) Về hạ tầng logistics chưa thành hình: Hiện trạng hạ tầng hậu cần còn rất thô sơ, còn thiếu các trung tâm phân phối và khu chức năng chuyên dụng, chưa đáp ứng được các tiêu chuẩn vận tải đa phương thức; (3) Về môi trường sinh thái cần bảo tồn: Vì nằm ngay vùng chuyển tiếp của Khu Dự trữ sinh quyển, mọi hoạt động phát triển đều chịu sự ràng buộc nghiêm ngặt. Bài toán cốt lõi là phát triển cân bằng, không đánh đổi môi trường lấy tăng trưởng kinh tế.

3. BÀI HỌC KINH NGHIỆM TỪ KHU THÍ ĐIỂM THƯƠNG MẠI TỰ DO LINGANG NEW AREA

3.1. Giới thiệu chung về khu Lingang New Area

Khu FTZ Lingang nằm tại cực Đông Nam của Thượng Hải tọa lạc tại vị trí chiến lược kết nối giữa cửa sông Dương Tử và vịnh Hàng Châu. Được thành lập chính thức vào năm 2019 như một phần mở rộng của Khu thí điểm Thương mại tự do Thượng Hải (SFTZ), Lingang đóng vai trò là Pilot quy mô lớn để thử nghiệm các chính sách kinh tế vượt trội. Với quy mô diện tích lên đến 873 km^2, khu vực này được định vị là một đô thị cảng thông minh, hiện đại, tích hợp sâu giữa công nghiệp công nghệ cao và dịch vụ logistics quốc tế. Về quy mô dân số, Lingang hướng tới mục tiêu đón 2,5 triệu dân vào năm 2035, tạo nên một trung tâm kinh tế biển năng động, thúc đẩy vị thế của Thượng Hải trên bản đồ hàng hải toàn cầu.

3.2. Chiến lược 10 + X trong phân vùng không gian chức năng và tổ chức giao thông đa tầng, đa phương thức

Thành tố 10 trong chiến lược Lingang đại diện cho việc quy hoạch các vùng công nghiệp nén với quy mô chuẩn 10 km^2, được dành riêng cho các ngành sản xuất cốt lõi và hạ tầng không thể thay đổi. Cụ thể, Lingang thiết lập các khu công nghiệp quy mô 10 km^2 để dự trữ cho việc mở rộng ngành công nghiệp mạch tích hợp (IC) tại các phân khu tiên phong. Các vùng lõi 10 km^2 này đóng vai trò là hạt nhân sản xuất tiên tiến, từ chế tạo thiết bị đến đóng gói cao cấp, tạo ra bộ khung vững chắc để hỗ trợ chuỗi cung ứng công nghệ cao [5].

Trên nền tảng đó, Lingang phát triển một mô hình tổ chức không gian theo hướng cụm liên kết (clustering), thay vì phân tách các khu chức năng. Cảng biển, khu công nghiệp, dịch vụ logistics và đô thị không tồn tại như những thực thể độc lập mà được tích hợp thành các cụm chuyên biệt nhưng liên hoàn, tạo nên một cấu trúc linh hoạt và hiệu quả. Việc xác lập quy mô 10 km^2 cho các vùng lõi kết hợp với mô hình cụm liên kết giúp Lingang duy trì tính xác định của hạ tầng chuyên dụng, đồng thời tối ưu hóa dòng chảy giữa sản xuất và hậu cần, ngăn chặn sự rời rạc trong cấu trúc đô thị cảng hiện đại [6]. Các luồng vận tải logistics tải trọng lớn được định tuyến trên các trục cứng với thiết kế tiêu chuẩn công nghiệp và tách biệt hoàn toàn khỏi luồng giao thông hành khách hay đường dạo bộ. Sự phân luồng độc lập này giúp luồng hàng hóa luân chuyển với tốc độ cao giữa cảng biển, khu công nghiệp và hệ thống kho vận đa phương thức, nhưng vẫn đảm bảo được an toàn lưu thông trong đô thị.

Về môi trường đô thị, chiến lược lấy hồ Dishui và mạng lưới kênh dẫn làm trọng tâm điều tiết hướng tâm: Khu đô thị mới Nanhui là hạt nhân với quy mô 10 km^2, trong khi các biến số X là những hành lang xanh đan cài, kết nối trực tiếp từ lõi mặt nước trung tâm đến các dải sinh thái ven biển. Sự phân vùng này cho phép các khoảng trống X đóng vai trò là hạ tầng bọt biển, giúp hấp thụ nước mưa và giảm thiểu rủi ro ngập lụt cho vùng lõi nén, đồng thời tạo ra các dư địa phát triển linh hoạt trong tương lai [6].



Hình 2. Chiến lược 10 + X được thể hiện trên bản đồ quy hoạch tổng thể khu Lingang FTZ *(Nguồn: https://en.lingang.gov.cn/)*

3.3. Biến số X trong các chính sách phát triển kinh tế và khoảng trống linh hoạt

Biến số X tại Lingang tượng trưng cho các cụm chức năng vệ tinh chuyên biệt như khu hợp tác đổi mới quốc tế, cụm R&D và khu phi thuế quan, tạo thành một mạng lưới sản xuất - nghiên cứu - xuất khẩu khép kín. Tuy nhiên, về mặt tư duy quy hoạch, X còn là những khoảng trống linh hoạt chiến lược về cả vật lý lẫn thể chế. Thay vì xây dựng dàn trải, Lingang chủ động chừa lại các vùng đệm sinh thái và các khu vực chưa xác định cứng công năng để làm phòng thí nghiệm chính sách hoặc để đô thị có thể tự điều chỉnh trước các biến động kinh tế và biến đổi khí hậu.

Sự linh hoạt của X còn được hỗ trợ bởi hệ thống các Hub trung chuyển điều phối. Tại các điểm giao cắt giao thông trên các trục cứng, hệ thống bố trí các Trung tâm thu gom hàng hóa (UCC) và Trung tâm phân phối (UDC) hoạt động như những van điều tiết hàng hóa. Song song đó, các điểm kết nối giao thông hành khách được phát triển theo mô hình TOD nhằm tạo ra các cụm dân cư nén gắn liền với vận tải công cộng [7]. Chính sự kết hợp giữa các lõi xác định "10" và biến số linh hoạt "X" đã biến Lingang thành một đô thị logistics không phát triển manh mún, vừa đảm bảo năng lực vận hành toàn cầu, vừa giữ lại dư địa để bảo tồn sinh thái và ứng biến linh hoạt trong tương lai.

4. CÁC CHIẾN LƯỢC ÁP DỤNG CHO ĐÔ THỊ LOGISTICS BÌNH KHÁNH

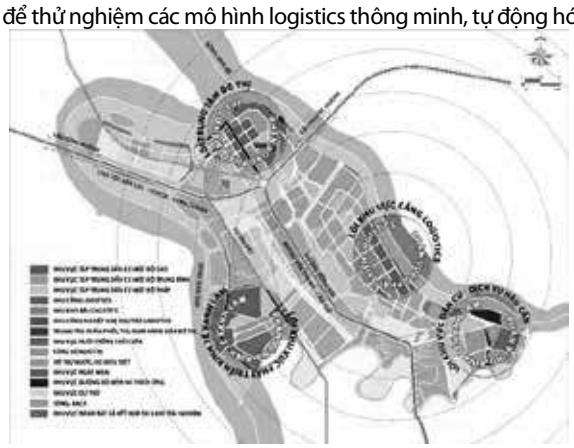
4.1. Định hướng phát triển không gian

Định hướng phát triển không gian Bình Khánh được xác lập thông qua việc chuyển hóa "chiến lược 10 + X" từ Lingang vào điều kiện đặc thù của vùng cửa ngõ Cần Giờ. Trước hết, xác định Vùng động lực (tương đương thành tố 10) được xác định là phân vùng phát triển logistics với lõi là hệ thống cảng - kho bãi - công nghiệp nhẹ quy mô lớn dọc theo sông Lòng Tàu. Không gian lõi này bao gồm các khu chức năng: trung tâm logistics (300 ha), cảng tiềm năng (100 ha) và khu vực hậu cần phục vụ logistics (300 ha). Nơi đây đóng vai trò là động lực tăng trưởng kinh tế chủ đạo, tận dụng lợi thế luồng hàng hải dọc sông Lòng Tàu để vận hành chuỗi cung ứng hàng hóa năng suất cao.

Chiến lược phát triển mạng lưới cụm chức năng mở rộng (tương đương biến số "X" về chức năng) được tổ chức theo mô hình cụm liên kết: Không gian đô thị đan xen linh hoạt giữa logistics, công nghiệp sạch, dân cư và sinh thái ven sông. Đô thị Bình Khánh cũng định hướng phát triển Khu thương mại tự do và Khu phi thuế quan gắn liền với hệ thống cảng biển trên sông, đóng vai trò hạt nhân kích cầu các ngành vệ tinh như đổi mới sáng tạo, R&D, năng lượng thủy lưu,...

Đặc biệt, chiến lược giữ lại "Khoảng trống linh hoạt" chiến lược (tương đương biến số "X" về không gian vật lý và chính sách) được xem là giải pháp then chốt để ứng biến trước các biến động. Tại Bình Khánh, điều này được hiện thực hóa bằng việc không lấp đầy mật độ xây dựng mà chủ động chừa lại dư địa dự trữ sinh thái và hành lang xanh, công

viên ngập nước. Các không gian này giúp đô thị thích ứng với rủi ro ngập lụt, biến đổi khí hậu và đóng vai trò là phòng thí nghiệm chính sách để thử nghiệm các mô hình logistics thông minh, tự động hóa.



Hình 3. Lõi động lực trong các phân vùng phát triển không gian đô thị logistics Bình Khánh

4.2. Định hướng phát triển giao thông

Để các không gian 10 và X vận hành, chiến lược phát triển Bình Khánh đặt nền tảng trên mạng lưới giao thông kết nối đa tầng, đa phương thức. Cấu trúc giao thông sử dụng các trục cứng (Cao tốc Bến Lức - Long Thành, đường Rừng Sác) kết hợp với các trục mềm (hành lang sông Lòng Tàu, Soài Rạp và các sông nhỏ, rạch nhánh) để tối ưu hóa khả năng luân chuyển hàng hóa.

Hệ thống giao thông tại đây hướng tới việc tách biệt dòng chảy vận tải nặng khỏi không gian dân sinh thông qua việc thiết lập các tuyến hành lang chuyên dụng. Đặc biệt, các tuyến vận tải thủy nội đô và ven đô được tái thiết lập thành mạng lưới vận chuyển chiến lược, kết nối trực tiếp với các trung tâm hàng hóa lớn. Việc tích hợp luồng chảy logistics đa phương thức giữa đường thủy, đường bộ và đường sắt nhằm tận dụng lợi thế quy mô, san sẻ áp lực hạ tầng, giảm phát thải carbon, hiện thực hóa mục tiêu phát triển bền vững cho toàn khu vực.

4.3. Đề xuất chính sách phát triển hướng đến kinh tế Xanh lam

Các chính sách phát triển tại Bình Khánh cần được thiết lập nhằm tận dụng tối đa cơ chế đặc thù từ Nghị quyết số 98/2023/QH15 ngày 24/6/2023 của Quốc hội về thí điểm một số cơ chế, chính sách đặc thù phát triển TP.HCM, được sửa đổi, bổ sung bởi Nghị quyết số 260/2025/QH15 ngày 11/12/2025. Nghiên cứu đề xuất việc thí điểm cơ chế Khu thương mại tự do và Khu phi thuế quan gắn liền với cảng biển, tạo ra một sandbox về thể chế để thu hút các tập đoàn logistics xanh toàn cầu thông qua các ưu đãi thuế quan và đơn giản hóa thủ tục hải quan. Tại vùng lõi động lực logistics, hàng hóa luân chuyển giữa các cầu cảng dọc sông Lòng Tàu và kho bãi sẽ được giám sát bằng công nghệ định vị thời gian thực, cho phép thông quan tự động mà không cần dừng chờ kiểm hóa tại từng phân khu, tương tự cách thức vận hành tối ưu của cảng Dương Sơn. Đồng thời, có thể áp dụng mức thuế thu nhập doanh nghiệp ưu đãi cho các đơn vị logistics cam kết sử dụng thiết bị nâng hạ chạy điện và hệ thống kho bãi tự động hóa, tích hợp mái che pin mặt trời trên diện tích kho bãi. Lượng điện dư thừa từ các bề mặt này sẽ được tích hợp vào lưới điện thông minh để phục vụ hệ thống xe tự hành và các trạm sạc điện cho tàu biển, hướng đến các chỉ tiêu về cảng xanh theo TCCS 02:2022/CHHVN và mục tiêu Net Zero 2050.

Bên cạnh đòn bẩy kinh tế, bài toán bảo tồn được giải quyết thông qua các cơ chế chuyển đổi quyền phát triển (TDR), cho phép các nhà đầu tư có quỹ đất trong vùng hành lang xanh (X) được chuyển đổi hạn mức xây dựng sang các cụm cluster trong vùng lõi (10), từ đó đảm bảo lợi ích kinh tế mà vẫn duy trì được độ xốp tự nhiên của đô thị. Mọi dòng chảy hàng hóa và hoạt động sản xuất tại đây đều phải tuân thủ hệ thống giám sát sinh học, đảm bảo các chỉ số phát thải và tiếng ồn không vượt ngưỡng chống chịu của khu vực.



Hình 4. Minh họa các chính sách phát triển trong vùng Lõi động lực Logistics

Việc triển khai đồng bộ các chính sách này sẽ giúp cho Bình Khánh phát triển kinh tế nhưng vẫn gìn giữ di sản thiên nhiên. Các không gian X khi đó không còn là những vùng ngập nước chờ đợi để lấp đầy, mà là những phòng thí nghiệm, hiệu chỉnh các mô hình kinh tế mới, đưa nơi đây trở thành cửa ngõ hậu cần vững vàng cho Thành phố trong bước tiến về phía biển.

5. KẾT LUẬN

Một thành phố tốt không nhất thiết là một đô thị với dư đồ hoàn hảo, mà là thành phố biết để dành chỗ cho tương lai. Nhìn lại hành trình từ những bài học tại Lingang đến thực tại của Bình Khánh, ta nhận ra quy hoạch là nỗ lực thiết lập một hệ khung cấu trúc linh hoạt, thích ứng. "Chiến lược 10 + X" chính là minh chứng: một mặt xác lập những vùng lõi nén xác định để đảm bảo tăng trưởng kinh tế logistics, mặt khác giữ lại những khoảng trống linh hoạt để đô thị được hít thở và tự phục hồi. Nghiên cứu khẳng định rằng, tương lai của Bình Khánh nằm ở khả năng thiết lập một cấu trúc không gian trong ngưỡng chống chịu để dòng chảy hàng hóa cường độ cao và hệ sinh thái nhạy cảm có thể cùng tồn tại và cộng sinh. Bình Khánh, khi đó, ngoài vai trò là một hub hạ tầng trong chuỗi cung ứng toàn cầu, sẽ trở thành một nơi chốn được nuôi dưỡng và bồi đắp trong sự cân bằng giữa lợi ích kinh tế và giá trị sinh thái.

Nghiên cứu kiến nghị triển khai khung pháp lý cho cơ chế chuyển đổi quyền phát triển (TDR) nhằm bảo vệ các hành lang sinh thái trong khu vực mà không cản trở động lực đầu tư; tiếp đến là đi sâu vào việc định lượng độ xốp sinh thái, khả năng chống chịu và thích ứng của khu vực thông qua các công nghệ cảm biến thời gian thực và ứng dụng mô hình Digital Twin để điều hành dòng chảy đô thị, không chỉ quản lý trên bản đồ GIS. Việc mở rộng nghiên cứu sang các mô hình tín chỉ carbon và năng lượng tái tạo sẽ là chìa khóa để Bình Khánh trở thành một *pilot xanh lam*, tạo lập vị thế tiên phong cho TP.HCM trong kỷ nguyên vươn mình của dân tộc, thông qua mô hình kinh tế biển - bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J.-P. R. v. L. Dablanc. What is City Logistics?, 2024. Imternet: https://transportgeography.org/contents/geography-city-logistics/what-is-city-logistics/. (accessed: 4/2026).

[2] B. Linh. Đề xuất phát triển cluster cảng Hải Phòng theo mô hình nền kinh tế xanh lam. Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải, số 05, tập 32, tr. 91-96, 2019.

[3] N.H.Thục. Phát triển vùng TP.HCM - cửa ngõ quốc tế theo mô hình cluster, TP.HCM - Tầm nhìn kinh tế biển kết nối chuỗi đô thị quốc tế, TP.HCM, 2021.

[4] J. Robinson. Financing urban development, three business models: Johannesburg, Shanghai and London. Progress in Planning, vol. 154, p. 100513, 2021.

[5] L.-g. S. A. Administration. China Pilot Free Trade Zone, 30/10/2020. Internet: https://en.lingang.gov.cn/html/website/lg/English/about/planning/558592.html (accessed: 4/2026).

[6] Y. Y. v. X. J. D. Ye. Planning and Construction Practice for Sponge City in Shanghai: Experience and Reference, in Proceedings of the 54th ISOCARP Congress, Norway, 2018.

[7] L. C. B. Z. Q. Z. v. Y. C. H. Xu. Green stormwater infrastructure eco-planning and development on the regional scale: a case study of Shanghai Lingang New City. East China, Frontiers of Earth Science, vol. 10, no. 2, p. 366-377, 2016.

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1125/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt Đồ án điều chỉnh quy hoạch chung TP.HCM đến năm 2040, tầm nhìn đến năm 2060, 2025.

■Ngày nhận bài: 29/9/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2026

Kết nối hạ tầng giao thông phát triển kinh tế biển Khánh Hòa và Đắk Lắk: Thực trạng và hàm ý quy hoạch

Transport infrastructure connectivity for marine economic development in Khanh Hoa and Dak Lak: Current status and planning implications

> TS TRẦN THỊ QUỲNH NHƯ, THS HÀ THỊ TRÚC LAN*
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
*Email: lan.ha@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu phân tích kết nối hạ tầng giao thông phục vụ phát triển kinh tế biển tại Khánh Hòa và Đắk Lắk, kết hợp thống kê mô tả giai đoạn 2021 - 2025 theo địa giới sau sáp nhập với phân tích hành lang và đầu mối logistics. Theo niên giám quốc gia, khối lượng hàng hóa vận chuyển năm 2025 đạt 43.696,6 nghìn tấn tại Khánh Hòa và 36.040,5 nghìn tấn tại Đắk Lắk. Chuỗi số liệu cho thấy diễn biến vận tải khác nhau giữa hai tỉnh, trong khi sản lượng cá biển khai thác đều tăng so với năm 2021. Đối chiếu với hồ sơ hạ tầng cho thấy yêu cầu hoàn thiện đường tiếp cận Nam Vân Phong và phối hợp năng lực tuyến trục với dịch vụ cảng. Các hàm ý quy hoạch tập trung vào kết nối liên tục, phân kỳ đầu tư logistics theo nguồn hàng và phối hợp liên tỉnh. Kết quả cung cấp căn cứ xác định ưu tiên quy hoạch và nội dung khảo sát dự án.

Từ khóa: Kết nối giao thông; kinh tế biển; logistics; Khánh Hòa; Đắk Lắk.

ABSTRACT

This study examines transport infrastructure connectivity supporting marine economic development in Khanh Hoa and Dak Lak. It combines descriptive analysis of 2021–2025 statistics compiled for the post-merger administrative boundaries with an assessment of transport corridors and logistics nodes. The national statistical yearbook reports freight volumes of 43,696.6 thousand tonnes for Khanh Hoa and 36,040.5 thousand tonnes for Dak Lak in 2025. The data reveal different freight trends across the two provinces, while marine capture fish production increased in both compared with 2021. Infrastructure documents highlight the need to complete access links to Nam Van Phong and coordinate trunk-route capacity with port services. Planning implications focus on continuous connections, phased logistics investment aligned with cargo demand, and interprovincial coordination. The findings provide a basis for identifying planning priorities and the data needed for project-level assessment.

Keywords: Transport connectivity; marine economy; logistics; Khanh Hoa; Dak Lak.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sắp xếp đơn vị hành chính năm 2025 làm thay đổi không gian quản lý kết nối giao thông giữa Khánh Hòa và Đắk Lắk. Khánh Hòa mới gồm Khánh Hòa và Ninh Thuận trước đây, Đắk Lắk mới gồm Đắk Lắk và Phú Yên trước đây [1]. Tỉnh Đắk Lắk mới có địa bàn trải dài từ cao nguyên đến duyên hải, mở ra khả năng tổ chức liên kết nội tỉnh giữa vùng sản xuất và các cửa ngõ biển. Trong cấu trúc mới, mối quan hệ với Khánh Hòa cần được xem xét theo mạng lưới vận chuyển và dịch vụ cảng, thay vì chỉ theo ranh giới quản lý.

Cách tiếp cận vùng hóa cảng [2] đặt cảng biển trong quan hệ với vùng cung ứng hàng và đầu mối nội địa. Nguyen và cộng sự [3] xem xét lợi ích của người sử dụng, các bên tại cảng biển và cộng đồng; Rožić và cộng sự [4] nhấn mạnh sự phối hợp dòng hàng giữa đầu mối nội địa và cảng. Vận dụng các tiếp cận này, nghiên cứu đặt câu hỏi: những hạn chế nào của tuyến trục, đường tiếp cận và dịch vụ đầu mối cần được ưu tiên xử lý? Phân tích tập trung vào vận tải hàng hóa và logistics gắn với cảng, thủy sản; không bao quát mọi lĩnh vực của kinh tế biển.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguồn dữ liệu và phạm vi nghiên cứu

Nguồn dữ liệu lấy từ "Phụ lục 34 tỉnh, thành phố" của Niên giám thống kê 2025 [5], gồm 5 năm hoàn chỉnh gần nhất: 2021 - 2025. Các năm trước sáp nhập đã được Cục Thống kê biên soạn theo địa giới mới. Số liệu năm 2025 phản ánh năm đã kết thúc, được giữ nhãn "sơ bộ" theo nguồn công bố và có thể được cơ quan thống kê điều chỉnh.

Đối chiếu niên giám tỉnh cho thấy khác biệt cần lưu ý. Cùng địa giới, vận chuyển Khánh Hòa năm 2025 là 65.618 nghìn tấn theo nguồn tỉnh và 43.696,6 nghìn tấn theo nguồn quốc gia [5, 6]. Với Đắk Lắk cũ năm 2024, hai nguồn lần lượt ghi 9.869 và 22.162,7 nghìn tấn [5, 7]. Chú giải chưa đủ để xác định nguyên nhân chênh lệch. Vì vậy, nghiên cứu sử dụng nhất quán chuỗi quốc gia cho so sánh hai tỉnh, không ghép các nguồn.

Đối chiếu xu hướng cho thấy vận chuyển Khánh Hòa giai đoạn 2023 - 2025 tăng 17,95% theo nguồn quốc gia và 17,61% theo nguồn tỉnh. Đắk Lắk cũ năm 2024 giảm 10,62% theo nguồn quốc gia nhưng tăng 1,01% theo nguồn tỉnh.

Các biểu vận tải quốc gia không gồm doanh nghiệp nhà nước do Trung ương quản lý, phản ánh hoạt động của đơn vị thuộc phạm vi thống kê, không đo trực tiếp luồng hàng liên tỉnh hay hàng qua cảng. Tổng sản lượng thủy sản được bổ sung bằng chỉ tiêu cá biển khai thác để làm rõ nguồn hàng gắn với biển. Sản lượng sản xuất, khối lượng vận chuyển và hàng hoá thông qua cảng được phân tích riêng vì khác nội hàm và có thể trùng hàng hóa giữa các công đoạn.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Thống kê mô tả được sử dụng để so sánh quy mô và diễn biến qua các năm. Tốc độ biến động tính bằng (giá trị cuối kỳ/giá trị đầu kỳ - 1) × 100%; chỉ số phát triển lấy năm 2021 bằng 100. Năm 2023 được dùng làm mốc bổ sung để xem xét diễn biến gần đây. Cự ly vận chuyển bình quân bằng khối lượng luân chuyển (tấn.km) chia khối lượng vận chuyển (tấn), sau khi quy đổi đơn vị; chỉ tiêu này mô tả cơ cấu vận chuyển, không đại diện cự ly đến cảng.

Tài liệu hạ tầng được cập nhật đến ngày 10/10/2026. Các trường hợp Buôn Ma Thuột - Vân Phong, Bãi Gốc - Quốc lộ 1 - Vân Phong và Cam Ranh được lựa chọn theo chức năng kết nối và khả năng kiểm chứng. Phân tích đối chiếu tính liên tục của tuyến, đường tiếp cận, dịch vụ đầu mối và khả năng duy trì vận tải; phân biệt quy hoạch, xây dựng với khai thác.

3. THỰC TRẠNG KẾT NỐI VÀ NHU CẦU LOGISTICS

3.1. Cấu trúc kết nối vùng sau sáp nhập

Quy hoạch Phú Yên năm 2023 định hướng logistics gắn với Vũng Rô, Bãi Gốc và đầu mối nội địa, đồng thời xác lập hướng kết nối Bãi Gốc - Quốc lộ 1 - Vân Phong [8]. Định hướng trước sáp nhập này cho thấy quan hệ giữa các cửa ngõ biển đã vượt ranh giới tỉnh. Sau sáp nhập, kết nối cao nguyên với duyên hải Phú Yên trước đây trở thành liên kết nội tỉnh Đắk Lắk, còn hướng Vân Phong tiếp tục cần phối hợp với Khánh Hòa. Thay đổi phạm vi quản lý vì thế đòi hỏi rà soát lại trách nhiệm đầu tư trên từng đoạn nối.

Trên hướng Buôn Ma Thuột - Vân Phong, hồ sơ Quốc lộ 26B xác định tuyến nối ĐT.652D với nút giao Quốc lộ 1 - cao tốc Khánh Hòa - Buôn Ma Thuột [9]. Khả năng tiếp cận cảng phụ thuộc sự liên tục từ tuyến trục qua nút giao đến đường địa phương. Một tuyến trục được tăng năng lực chỉ tạo thuận lợi cho vận tải khi các khâu tiếp nhận, bốc xếp và giao hàng đáp ứng tương ứng. Do đó, lựa chọn cửa ngõ phải xét cả dịch vụ cảng, thị trường và tổng chi phí hành trình.

Thay đổi địa giới cần được tách khỏi tăng trưởng. Trong cùng niên giám quốc gia, vận chuyển năm 2024 của Đắk Lắk cũ là 22.162,7 nghìn tấn và Phú Yên là 12.062,3 nghìn tấn; tổng bằng 34.225,0 nghìn tấn theo Đắk Lắk mới [5, biểu 318 và 134]. Chuỗi cùng lãnh thổ ở Bảng 1 giúp tránh xem quy mô bổ sung do sáp nhập là kết quả cải thiện kết nối.

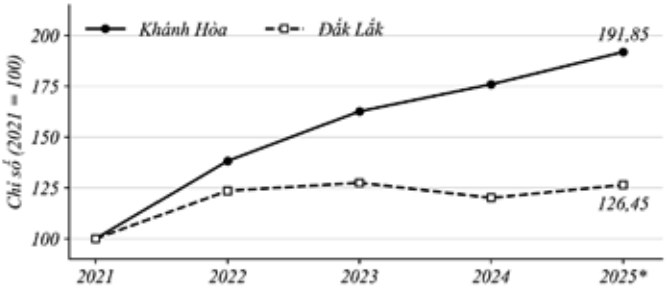
3.2. Diễn biến vận tải hàng hóa giai đoạn 2021 - 2025

Bảng 1. Vận chuyển và luân chuyển hàng hóa giai đoạn 2021 - 2025

Tỉnh / chỉ tiêu	2021	2022	2023	2024	2025*
Khánh Hòa / Q	22.777,0	31.485,6	37.047,3	40.078,3	43.696,6
Khánh Hòa / T	1.752,0	2.206,0	2.491,9	2.952,5	2.887,4
Đắk Lắk / Q	28.501,1	35.213,5	36.342,7	34.225,0	36.040,5
Đắk Lắk / T	3.071,1	3.857,5	3.965,9	3.730,1	3.942,2

*Nguồn: [5], Phụ lục, biểu 134-135, tr. 1420, 1422. Q: vận chuyển (nghìn tấn); T: luân chuyển (triệu tấn.km). *Sơ bộ. Cùng địa giới sau sáp nhập; không gồm doanh nghiệp nhà nước do Trung ương quản lý.*

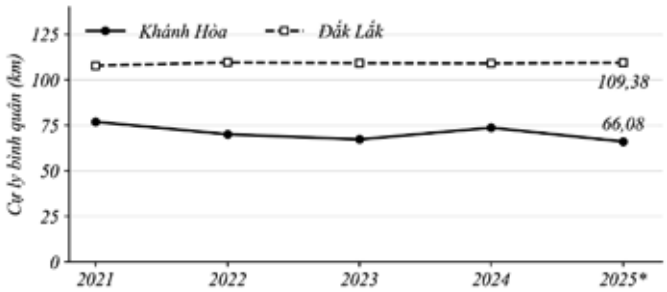
Giai đoạn 2021 - 2025, vận chuyển Khánh Hòa tăng 91,85%, cao hơn mức 26,45% của Đắk Lắk (Bảng 1). Chỉ số ở Hình 1 làm rõ sự khác biệt: Khánh Hòa tăng liên tiếp, trong khi Đắk Lắk giảm năm 2024 rồi phục hồi năm 2025. Quy mô cuối kỳ của hai tỉnh lần lượt đạt 43.696,6 và 36.040,5 nghìn tấn, nhưng diễn biến này chưa xác định lượng hàng sử dụng từng hành lang.



Hình 1. Chỉ số khối lượng hàng hóa vận chuyển, 2021 - 2025 (2021 = 100)

*Nguồn: Nhóm tác giả tính từ [5], biểu 134. *Sơ bộ; phạm vi thống kê như Bảng 1*

So với năm 2023, vận chuyển Khánh Hòa tăng 17,95%, còn Đắk Lắk thấp hơn 0,83%. Hai mốc so sánh cho thấy không nên suy luận mức tăng toàn kỳ thành tốc độ nhu cầu tương lai. Xu hướng tăng của Khánh Hòa gợi ra yêu cầu kiểm tra năng lực đầu mối. Với Đắk Lắk, cần phân tích cơ cấu hàng và thị trường trước khi điều chỉnh quy mô đầu tư.



Hình 2. Cự ly vận chuyển hàng hóa bình quân giai đoạn 2021 - 2025

*Nguồn: Nhóm tác giả tính từ [5], biểu 134-135. *Sơ bộ; phạm vi thống kê như Bảng 1*

Năm 2025, vận chuyển Khánh Hòa tăng 9,03% nhưng luân chuyển giảm 2,20%; cự ly bình quân giảm từ 73,67 xuống 66,08 km. Ngược lại, cự ly bình quân Đắk Lắk duy trì khoảng 108 - 110 km trong cả giai đoạn (Hình 2). Khác biệt này đặt ra yêu cầu tách các nhóm hành trình khi quy hoạch điểm gom hàng. Cự ly ngắn hơn có thể gắn với thay đổi cơ cấu vận chuyển; chưa thể coi đó là bằng chứng cao tốc rút ngắn hành trình hoặc logistics hiệu quả hơn.

Vận chuyển đường bộ năm 2025 tại Khánh Hòa đạt 42.958,2 nghìn tấn, chiếm 98,31% tổng số; tại Đắk Lắk bằng tổng khối lượng công bố [5, biểu 136]. Kết quả cho thấy vai trò chủ đạo của đường bộ trong phạm vi đơn vị được thống kê, hỗ trợ việc tập trung rà soát

đường tiếp cận cảng và điểm gom hàng. Như vậy, để đánh giá cơ cấu vận tải toàn vùng cần bổ sung hoạt động của các đơn vị ngoài phạm vi này, nhất là đường sắt và vận tải biển.

3.3. Sản lượng thủy sản và nhu cầu dịch vụ logistics

Bảng 2. Sản lượng thủy sản và cá biển khai thác, 2021 - 2025 (nghìn tấn)

Tỉnh / chỉ tiêu	2021	2022	2023	2024	2025*
Khánh Hòa / TS	244,741	253,585	264,799	269,712	271,998
Khánh Hòa / CB	206,0	210,5	220,4	221,8	223,0
Đắk Lắk / TS	100,733	102,934	106,779	111,727	115,536
Đắk Lắk / CB	57,7	57,2	59,1	60,9	64,1

*Nguồn: [5], Phụ lục, biểu 117 và 119, tr. 1380, 1383. *Sơ bộ; cùng địa giới sau sáp nhập* Tổng thủy sản gồm khai thác và nuôi trồng; cá biển khai thác là một bộ phận của tổng số. TS: tổng thủy sản; CB: cá biển khai thác.

Tổng sản lượng thủy sản tăng 11,14% tại Khánh Hòa và 14,70% tại Đắk Lắk (Bảng 2). Riêng cá biển khai thác tăng tương ứng 8,25% và 11,09%, đạt 223,0 và 64,1 nghìn tấn năm 2025. Nguồn hàng trực tiếp từ khai thác biển cũng mở rộng, nhưng mức tăng khác với tổng thủy sản. Hai chỉ tiêu cần được phân biệt khi đánh giá nhu cầu logistics phục vụ kinh tế biển.

Đối với nguồn hàng này, chất lượng kết nối còn thể hiện ở thời gian thu gom, chờ bốc xếp và điều kiện bảo quản. Rút ngắn thời gian chạy xe chỉ có ý nghĩa đầy đủ khi khâu tiếp nhận và dịch vụ lạnh vận hành phù hợp. Vì vậy, quy hoạch đường bộ cần gắn với cơ sở sơ chế, kho lạnh và điện dự phòng. Công suất đầu tư phải tính theo mùa vụ, tỷ lệ hàng cần bảo quản và thời gian lưu kho; tổng sản lượng năm chỉ là căn cứ ban đầu.

3.4. Hạn chế trong kết nối hạ tầng và dịch vụ logistics

Hạn chế nổi bật nhất là sự chưa đồng bộ giữa các cấp kết nối (Bảng 3). Tiến độ từng thành phần cao tốc [10, 11] chưa phản ánh khả năng khai thác toàn tuyến. Trong khi đó, hồ sơ năm 2025 ghi Quốc lộ 26B hiện hữu hai làn, mặt đường 7 m [9]; thông tin tháng 08/2026 cho biết ĐT.652B-ĐT.652D còn vướng mặt bằng [12]. Những căn cứ này đặt ra yêu cầu hoàn thiện đồng thời tuyến trục và đường tiếp cận Nam Vân Phong, dù chưa đủ để lượng hóa mức ùn tắc.

Ở cấp đầu mối, Cảng Cam Ranh công bố sản lượng năm 2025 đạt 4,22 triệu tấn, đồng thời định hướng nâng cấp cầu cảng Ba Ngòi và kho bãi [13]. Hội thảo tại Đắk Lắk ghi nhận hạ tầng thiếu đồng bộ, chi phí logistics cao [14]. Hai nguồn cho thấy nhu cầu phối hợp giữa vận tải đường bộ, lưu kho và xếp dỡ. Tuy nhiên, sản lượng Cam Ranh chưa xác định phần hàng từ Đắk Lắk; ý kiến hội thảo cũng chưa thay thế được khảo sát chi phí theo hành lang.

Bảng 3. Tình trạng hành lang, đầu mối và yêu cầu kết nối

Hành lang / đầu mối	Tình trạng và căn cứ	Yêu cầu kết nối
Buôn Ma Thuột-Khánh Hòa	Thành phần 3 đạt 95,2% khối lượng thi công (ngày 22/4/2026) [10]; thành phần 2 đạt khoảng 78%, cơ bản thông xe kỹ thuật 35/37 km (ngày 11/9/2026) [11].	Đồng bộ toàn tuyến, nút giao và đường đến đầu mối; chưa coi thông xe kỹ thuật là khai thác hoàn chỉnh.
Quốc lộ 26B-ĐT.652D-Nam Vân Phong	Hồ sơ 7/2025: Quốc lộ 26B hiện hữu hai làn, mặt đường 7 m [9]. Tin ngày 14/8/2026: ĐT.652B-ĐT.652D còn vướng mặt bằng rải rác [12].	Hoàn thiện các đoạn nối; phối hợp mặt bằng và tổ chức giao thông thi công.
Bãi Gốc-Quốc lộ 1-Vân Phong	Hướng kết nối trong quy hoạch Phú Yên năm 2023 [8]; trạng thái quy hoạch, chưa xác nhận khai thác.	Thống nhất đấu nối liên tỉnh; xác minh trạng thái đầu tư và nguồn hàng.
Cảng Cam Ranh	Sản lượng năm 2025 đạt 4,22 triệu tấn; định hướng nâng cấp cầu cảng Ba Ngòi và kho bãi tại đại hội cổ đông ngày 22/4/2026 [13].	Phối hợp đường tiếp cận với năng lực cầu bến, kho bãi và lịch tiếp nhận hàng.
Vùng nguyên liệu Đắk Lắk-đầu mối logistics	Hội thảo ngày 26/6/2026 ghi nhận hạ tầng thiếu đồng bộ, chi phí logistics cao [14]; chưa lượng hóa theo hành lang.	Xác minh điểm gom, cự ly vận chuyển và nhu cầu dịch vụ theo mùa vụ.

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp từ [8 - 14]. Tình trạng theo thời điểm công bố; cột cuối là đề xuất.

Khả năng duy trì dịch vụ cần được xem xét bên cạnh năng lực thông qua. Báo cáo thống kê Đắk Lắk ghi nhận ảnh hưởng của bão, mưa lũ tháng 11/2025 [15]; báo cáo giao thông năm 2026 đề cập khắc phục thiệt hại công trình [10]. Những thông tin này đặt ra yêu cầu khảo sát tuyến thay thế và thời gian khôi phục, đặc biệt đối với hàng dễ hư hỏng.

4. HÀM Ý QUY HOẠCH

4.1. Hoàn thiện kết nối giữa tuyến trục và các đầu mối

Từ các hạn chế tại Quốc lộ 26B và ĐT.652B-ĐT.652D, ưu tiên trước mắt là xử lý mặt bằng còn gián đoạn, hoàn thiện đoạn nối và rà soát nút giao đến khu công nghiệp, cảng. Phân kỳ đầu tư cần gắn với khả năng đưa từng đoạn cao tốc vào khai thác, để các hạng mục tạo thành hành trình liên tục. Mở rộng tiếp theo phải căn cứ lưu lượng, an toàn và thời gian chờ thực đo. Tại Cam Ranh, kế hoạch đường tiếp cận cần phối hợp với đầu tư cầu bến, kho bãi.

Việc rà soát cần đến cấp tổ chức vận hành: vị trí chờ xe, lịch tiếp nhận hàng, lối ra vào cảng và xung đột với giao thông dân cư. Đây là các nội dung giúp kiểm tra năng lực tiếp nhận khi tuyến trục được cải thiện. Thay vì đánh giá từng công trình riêng lẻ, hồ sơ dự án nên chỉ rõ đoạn phục vụ, đầu mối liên quan và điều kiện để toàn hành trình vận hành đồng bộ.

4.2. Phân kỳ đầu tư logistics theo nhu cầu vận chuyển

Diễn biến vận tải và khác biệt giữa các nguồn thống kê cho thấy công suất logistics phải được xác định theo nhóm hàng và khách hàng thực tế. Cách tiếp cận đa bên [3] gợi ý phối hợp chủ hàng, doanh nghiệp vận tải và cảng khi chọn vị trí điểm gom; vai trò điều tiết dòng hàng của đầu mối nội địa [4] cần được cụ thể hóa bằng dịch vụ kết nối và lịch vận chuyển. Số liệu cấp tỉnh giúp nhận diện xu hướng, còn phương án đầu tư cần chứng minh lượng hàng có thể thu hút.

Với thủy sản, bước đầu nên kiểm kê cơ sở lạnh hiện có, khảo sát mùa vụ, hao hụt và thời gian lưu kho. Công suất mới cần gắn với nhu

cầu đã kiểm chứng hoặc hợp đồng sử dụng dịch vụ, đồng thời dành khả năng mở rộng. Cách phân kỳ này phù hợp hơn với nguồn hàng biến động theo mùa, hạn chế việc nhiều đầu mối có cùng chức năng cùng dựa vào một lượng hàng dự kiến.

4.3. Phối hợp liên tỉnh trong đầu tư và quản lý vận hành

Hướng Bãi Gốc-Quốc lộ 1 - Vân Phong đặt ra yêu cầu thống nhất điểm đấu nối, phân kỳ và trách nhiệm đầu tư giữa hai tỉnh. Hồ sơ tuyến cần được đối chiếu với quy hoạch điều chỉnh sau sáp nhập và cập nhật trạng thái thực hiện. Cùng với hạ tầng, các cơ quan chuyên môn nên phối hợp doanh nghiệp chia sẻ dữ liệu nơi đi, nơi đến và dịch vụ cảng. Cơ chế này hỗ trợ lựa chọn cửa ngõ theo nhu cầu vận chuyển, đồng thời nhận diện công trình dùng chung cần ưu tiên.

Bảng 4. Định hướng quy hoạch và chỉ tiêu phục vụ đánh giá

Căn cứ phân tích	Hướng xử lý	Chỉ tiêu cần thu thập
Đường nối Nam Vân Phong còn hạn chế (Bảng 3)	Đồng bộ mặt bằng, đoạn nối và nút giao	Lưu lượng; thời gian hành trình; điểm xung đột
Cam Ranh có hoạt động khai thác và kế hoạch nâng cấp (Bảng 3)	Phối hợp đường tiếp cận, cầu bến và kho bãi	Thời gian chờ; công suất sử dụng; tỷ lệ đúng hạn
Vận tải khác biệt theo nguồn; cá biển khai thác tăng (mục 2.1, 3.3)	Phân kỳ điểm gom, cơ sở lạnh theo nhu cầu xác minh	Luồng hàng; mùa vụ; hợp đồng dịch vụ
Thiệt hại thiên tai được báo cáo [10, 15]	Rà soát tuyến dự phòng và điện cho cơ sở lạnh	Thời gian gián đoạn; thời gian khôi phục

Nguồn: Nhóm tác giả đề xuất từ kết quả phân tích. Chỉ tiêu phục vụ khảo sát và theo dõi, chưa phải kết quả đo lường.

Bảng 4 chuyển các hạn chế thành nội dung khảo sát và theo dõi. Dữ liệu cần thu thập theo mùa vụ, cùng định nghĩa và đơn vị tính giữa hai tỉnh. Luồng hàng, thời gian chờ, chi phí và độ ổn định hành trình là căn cứ để so sánh phương án đầu tư.

5. KẾT LUẬN

Phân tích giai đoạn 2021 - 2025 theo cùng địa giới cho thấy quy mô vận chuyển và sản lượng cá biển khai thác của cả hai tỉnh Khánh Hòa và Đắk Lắk tăng so với đầu kỳ, nhưng diễn biến vận tải lại khác nhau. Khi phân tích các kết quả này bên cạnh cơ sở hạ tầng, vấn đề quy hoạch giao thông nổi lên, điều này cho thấy cần có sự đồng bộ giữa tuyến trục, đường tiếp cận và dịch vụ đầu mối. Từ đó, bài nghiên cứu đề xuất ba hàm ý quy hoạch: hoàn thiện các đoạn nối Nam Vân Phong, phân kỳ logistics theo nguồn hàng đã xác minh và phối hợp liên tỉnh về đầu tư, vận hành. Bài nghiên cứu đã đóng góp liên kết bằng chứng thống kê với yêu cầu tại từng hành lang, đầu mối và chỉ tiêu khảo sát tương ứng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Nghị quyết số 202/2025/QH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh. 12/6/2025. Internet: https://vbpl.vn/TW/Pages/ivbpq-toanvan.aspx?ItemID=179501 (truy cập: tháng 9/2026).

[2] T. E. Notteboom và J.-P. Rodrigue. Port regionalization: Towards a new phase in port development. Maritime Policy & Management, vol. 32, no. 3, pp. 297-313, 2005, doi: 10.1080/03088830500139885.

[3] L. C. Nguyen, V. V. Thai, D. M. Nguyen and M. D. Tran. Evaluating the role of dry ports in the port-hinterland settings: Conceptual framework and the case of Vietnam. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol. 37, no. 4, pp. 307-320, 2021, doi: 10.1016/j.ajsl.2021.09.001.

[4] T. Rožić, D. Božić, I. Bajor và B. Andrlić. The ambidextrous role of inland terminals in enhancing port-hinterland connectivity. Logistics, vol. 9, no. 1, Art. no. 27, 2025, doi: 10.3390/logistics9010027.

[5] Cục Thống kê. Niên giám thống kê Việt Nam năm 2025. Hà Nội: NXB. Kinh tế - Tài chính, 2026, biểu 318, tr. 814; Phụ lục 34 tỉnh, thành phố, biểu 117, 119, 134-136, tr. 1380, 1383, 1420, 1422, 1424. Internet: https://www.nso.gov.vn/wp-content/uploads/2026/07/NG-TOAN-QUOC-2025_WM.pdf. (truy cập: tháng 9/2026).

[6] Thống kê tỉnh Khánh Hòa. Niên giám thống kê Khánh Hòa 2025, 2026, lời nói đầu, tr. 641-642 và biểu 246-247, tr. 651-652. Internet: https://thongkekhanhhoa.nso.gov.vn/nien-giam-thong-ke/3. (truy cập: tháng 9/2026).

[7] Chi cục Thống kê tỉnh Đắk Lắk. Niên giám thống kê tỉnh Đắk Lắk năm 2024, 2025, biểu 242-243, tr. 514-517; địa giới trước sáp nhập. Internet: https://thongkedaklak.nso.gov.vn/nien-giam-thong-ke/4. (truy cập: tháng 9/2026).

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1746/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch tỉnh Phú Yên thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 30/12/2023, mục VI và Phụ lục V. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=209358 (truy cập: tháng 10/2026).

[9] Ban Tuyên giáo và Dân vận Tỉnh ủy Khánh Hòa và Ban Quản lý dự án đầu tư xây dựng các công trình nông nghiệp và giao thông tỉnh. Đề cương tuyên truyền dự án nâng cấp, mở rộng đường Quốc lộ 26B, tỉnh Khánh Hòa, tháng 7/2025, tr. 2, 6-7. Internet: https://btgdvtukhanhhoa.vn/Media/Docs/110725080712670/De%20cuong%20tuyen%20truyen%20Du%20an%20Quoc%20lo%2026B%20-%20ban%20hoan%20chinh.pdf (truy cập: tháng 9/2026).

[10] UBND tỉnh Đắk Lắk. Báo cáo về tình hình thực hiện nhiệm vụ từ đầu năm 2026 đến nay, phương hướng, nhiệm vụ trọng tâm thời gian tới và các kiến nghị, đề xuất của tỉnh Đắk Lắk nhằm thực hiện mục tiêu tăng trưởng hai con số giai đoạn 2026 - 2030. Báo cáo số 146/BC-UBND, 22/4/2026, tr. 4. Internet: https://vpubnd.daklak.gov.vn/CMS/Content/VanBan/2026/4.2026/146_BC_UBND.pdf (truy cập: tháng 9/2026).

[11] Phan Trang. Hoàn thành cơ bản cao tốc Khánh Hòa - Buôn Ma Thuột trước 31/12/2026. Báo Điện tử Chính phủ, ngày 11/9/2026. Internet: https://baochinhphu.vn/hoan-thanh-co-ban-cao-toc-khanh-hoa-buon-ma-thuot-truoc-31-12-2026-102260911184628821.htm (truy cập: tháng 9/2026).

[12] Ban Quản lý Khu kinh tế và Khu công nghiệp tỉnh Khánh Hòa. Đẩy nhanh giải phóng mặt bằng, bảo đảm nguồn vật liệu cho các dự án giao thông, ngày 14/8/2026. Internet: https://bqlkktkcn.khanhhoa.gov.vn/article/tin-van/day-nhanh-giai-phong-mat-bang-bao-dam-nguon-vat-lieu-cho-cac-du-an-giao-thong.html (truy cập: tháng 9/2026).

[13] Công ty cổ phần Cảng Cam Ranh. Cảng Cam Ranh tổ chức thành công Đại hội đồng cổ đông năm 2026, ngày 22/4/2026. Internet: https://camranhport.vn/vn/nang-tam-quan-tri-kien-tao-vi-the-cang-cua-ngo-ben-vung.html (truy cập: tháng 9/2026).

[14] Thủy Loan. Thảo luận giải pháp phát triển khu, cụm công nghiệp gắn với công nghiệp chế biến sâu và logistics liên vùng. Cổng Thông tin điện tử tỉnh Đắk Lắk, ngày 26/6/2026. Internet: https://daklak.gov.vn/widget/-/thao-luan-giai-phap-phat-trien-khu-cum-cong-nghiep-gan-voi-cong-nghiep-che-bien-sau-va-logistics-lien-vung (truy cập: tháng 9/2026).

[15] Thống kê tỉnh Đắk Lắk. Báo cáo tình hình kinh tế - xã hội tháng 12 và năm 2025, ngày 07/01/2026. Internet: https://thongkedaklak.nso.gov.vn/tinh-hinh-kinh-te-xa-hoi/22 (truy cập: tháng 9/2026).

■Ngày nhận bài: 18/8/2026 ■Ngày sửa bài: 27/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 17/9/2026

Lựa chọn vị trí trung tâm mới trong cấu trúc đô thị đa trung tâm: Khung tiêu chí đề xuất cho đô thị loại I và II vùng Đồng bằng sông Hồng

New urban center location selection in polycentric cities: A proposed criteria framework for grade-I and grade-II Cities in the Red River Delta

> TS.KTS TRẦN QUÝ DƯƠNG
Khoa Kiến trúc và Quy hoạch, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: duongtq@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Trong quá trình chuyển dịch từ mô hình đô thị đơn trung tâm sang đô thị đa trung tâm (ĐTT), việc lựa chọn vị trí trung tâm mới (TTM) có ý nghĩa quan trọng đối với tổ chức không gian, phân bố dân cư và việc làm, kết nối hạ tầng và phát triển bền vững đô thị. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào cấu trúc không gian hoặc từng nhóm yếu tố riêng lẻ, trong khi còn thiếu một khung tiêu chí tổng hợp phục vụ lựa chọn vị trí TTM phù hợp với điều kiện Việt Nam. Nghiên cứu sử dụng các phương pháp tổng hợp, phân tích tài liệu, nghiên cứu trường hợp, điều tra xã hội học, so sánh và phân tích tổng hợp để xác định các yếu tố ảnh hưởng đến việc lựa chọn vị trí TTM tại ba địa điểm nghiên cứu thuộc vùng Đồng bằng sông Hồng, gồm Bắc sông Cấm (Hải Phòng), Từ Sơn (Bắc Ninh) và Bãi Cháy (Hạ Long). Kết quả cho thấy vị trí TTM chịu tác động đồng thời của năm nhóm yếu tố: điều kiện nền phát triển; kết nối giao thông; động lực phát triển kinh tế; điều kiện xã hội - môi trường; và phát triển bền vững.

Qua nghiên cứu thực tiễn, khoảng cách phù hợp giữa TTM và trung tâm đô thị lõi trong các trường hợp nghiên cứu dao động trong khoảng 7 - 20 km, với thời gian tiếp cận không quá 30 phút. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất khung tiêu chí gồm năm nhóm và 25 tiêu chí thành phần, làm cơ sở hỗ trợ đánh giá, so sánh các phương án lựa chọn vị trí TTM trong lập quy hoạch đô thị. Khung tiêu chí đồng thời tạo nền tảng cho việc lượng hóa các tiêu chí, xác định trọng số và xây dựng mô hình đánh giá đa tiêu chí trong các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: Đô thị đa trung tâm; trung tâm mới; lựa chọn vị trí; khung tiêu chí; quy hoạch đô thị; phát triển bền vững.

ABSTRACT

The transition from monocentric to polycentric urban development has made the selection of new urban center (NUC) locations increasingly important for spatial organization, the distribution of population and employment, infrastructure connectivity, and sustainable urban development. However, existing studies have mainly focused on spatial structure or individual influencing factors, while an integrated criteria framework for NUC location selection under Vietnamese conditions remains limited. This study employs literature review and analysis, case study, sociological survey, comparative analysis, and synthesis to identify the factors influencing NUC location selection in three cases in the Red River Delta: Bac Song Cam in Hai Phong, Tu Son in Bac Ninh, and Bai Chay in Ha Long. The findings indicate that NUC location is jointly influenced by five groups of factors: development conditions, transportation connectivity, economic development drivers, socio-environmental conditions, and sustainability. The empirical findings suggest that, for the studied cases, the empirical synthesis suggests a reference distance of approximately 7 - 20 km, with an access time of no more than 30 minutes. Based on these findings, the study proposes a criteria framework comprising five groups and 25 sub-criteria to support the evaluation and comparison of alternative NUC locations in urban planning. The framework also provides a basis for further quantification, weighting, and development of multi-criteria assessment models.

Keywords: Polycentric city; new urban center; location selection; criteria framework; urban planning; sustainable development.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những thập niên gần đây, quá trình đô thị hóa cùng yêu cầu nâng cao hiệu quả sử dụng đất, tăng cường liên kết vùng và phát triển bền vững đã thúc đẩy sự chuyển dịch từ mô hình đô thị đơn trung tâm sang đô thị ĐTT (Polycentric City). Trong cấu trúc này, các hoạt động kinh tế - xã hội được phân bố theo nhiều cực, góp phần giảm áp lực lên trung tâm hiện hữu, nâng cao khả năng tiếp cận việc làm và dịch vụ đô thị, đồng thời hình thành các cực tăng trưởng mới (Hall, 2002; Hall & Pain, 2006; OECD, 2020; ESPON, 2021; UN-Habitat, 2022; World Bank, 2023).

Trong mô hình đô thị ĐTT, TTM (New Urban Center) là khu vực phát triển mới có khả năng tập trung các chức năng đô thị quan trọng, hình thành một cực phát triển tương đối độc lập nhưng vẫn duy trì liên kết với trung tâm hiện hữu. Vì vậy, lựa chọn vị trí TTM không chỉ liên quan đến khả năng mở rộng quỹ đất mà còn quyết định khả năng kết nối, thu hút dân cư và đầu tư, tạo việc làm và hình thành vai trò của TTM trong cấu trúc đô thị.

Tại Việt Nam, định hướng phát triển hệ thống đô thị theo hướng hiện đại, đồng bộ, bền vững và hình thành các cực tăng trưởng mới ngày càng được thể hiện trong các chủ trương và quy hoạch ở cấp quốc gia, vùng và địa phương. Nghị quyết số 06-NQ/TW ngày 24/01/2022 của Bộ Chính trị và Quy hoạch tổng thể quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 đều nhấn mạnh yêu cầu tổ chức không gian đô thị, tăng cường liên kết và phát triển các cực tăng trưởng mới. Trong bối cảnh hệ thống đô thị và đơn vị hành chính có những thay đổi trong giai đoạn 2025 - 2026, yêu cầu lựa chọn vị trí các TTM trên cơ sở khoa học càng trở nên cần thiết.

Vùng Đồng bằng sông Hồng là khu vực có tốc độ đô thị hóa cao và giữ vai trò là vùng động lực phát triển của cả nước. Thực tiễn tại Bắc sông Cấm (Hải Phòng), Từ Sơn (Bắc Ninh) và Bãi Cháy (Hạ Long) cho thấy các TTM có những động lực hình thành khác nhau nhưng đều chịu tác động đồng thời của điều kiện nền, khả năng kết nối giao thông, động lực kinh tế, sức hấp dẫn xã hội - môi trường và yêu cầu phát triển bền vững.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về đô thị ĐTT, phần lớn tập trung vào cấu trúc không gian hoặc xem xét riêng lẻ các yếu tố như khả năng tiếp cận, giao thông, động lực kinh tế và sử dụng đất. Các nghiên cứu xây dựng một khung tiêu chí tổng hợp phục vụ trực tiếp lựa chọn vị trí TTM, đặc biệt trong điều kiện đô thị Việt Nam, vẫn còn hạn chế. Đây là khoảng trống cần được bổ sung nhằm tăng cường cơ sở khoa học cho công tác lập quy hoạch và quản lý phát triển đô thị.

Xuất phát từ khoảng trống trên, nghiên cứu tập trung vào ba mục tiêu: (i) hệ thống hóa cơ sở lý luận về lựa chọn vị trí TTM trong mô hình đô thị ĐTT; (ii) phân tích cơ sở thực tiễn thông qua các trường hợp nghiên cứu tại vùng Đồng bằng sông Hồng; và (iii) đề xuất khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM hỗ trợ quá trình lập quy hoạch và ra quyết định phát triển đô thị.

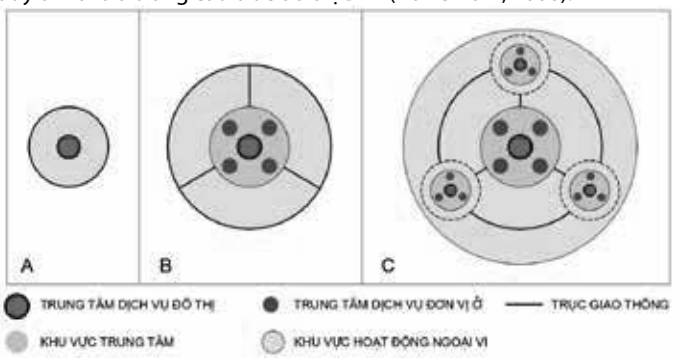
Trên cơ sở tích hợp lý luận và kết quả nghiên cứu thực tiễn, nghiên cứu đề xuất khung tiêu chí gồm năm nhóm và 25 tiêu chí thành phần. Đây là đóng góp chính của nghiên cứu, tạo cơ sở cho việc nhận diện, đánh giá và so sánh các phương án vị trí TTM trong quá trình lập quy hoạch; đồng thời có thể tiếp tục được lượng hóa, xác định trọng số và phát triển thành các mô hình đánh giá đa tiêu chí.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khái niệm TTM trong cấu trúc đô thị đa trung tâm

Đô thị ĐTT là mô hình tổ chức không gian trong đó tồn tại từ hai hoặc nhiều trung tâm có quy mô, chức năng và vai trò khác nhau, được liên kết thông qua hệ thống hạ tầng giao thông, mạng lưới kinh tế và các quan hệ xã hội. Khác với mô hình đơn trung tâm, đô thị ĐTT hướng tới phân bố hợp lý các chức năng đô thị, nâng cao hiệu quả sử dụng đất, giảm áp lực giao thông và cải thiện khả năng tiếp cận việc làm, dịch vụ đô thị (Hall, 2002; Hall & Pain, 2006; OECD, 2020).

Trong nghiên cứu này, TTM được hiểu là khu vực phát triển mới có khả năng tập trung các chức năng hành chính, thương mại, dịch vụ, công nghiệp, đổi mới sáng tạo hoặc các chức năng đô thị cấp cao khác, hình thành một cực phát triển tương đối độc lập nhưng vẫn duy trì liên kết với trung tâm hiện hữu (Parr, 2004; Meijers, 2008). Khả năng tạo việc làm, thu hút dân cư và cung cấp dịch vụ đô thị chất lượng cao là những điều kiện quan trọng để TTM hình thành và duy trì vai trò trong cấu trúc đô thị ĐTT (Hall & Pain, 2006).



A: Đô thị đơn TT B: Đô thị nhiều TT C: Đô thị ĐTT

Hình 1. Chuyển đổi từ cấu trúc đô thị đơn trung tâm sang ĐTT và vai trò của TTM

Nguồn: Tác giả tổng hợp và phát triển từ Hall & Pain (2006), bổ sung từ kết quả nghiên cứu của Trần Quý Dương (2025)

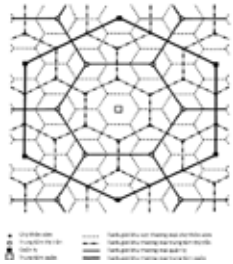
2.2. Cơ sở lý luận lựa chọn vị trí TTM

Việc lựa chọn vị trí TTM được tiếp cận từ các nhóm lý luận có quan hệ bổ trợ, gồm lý thuyết vị trí trung tâm, khả năng tiếp cận và khoảng cách, quy mô và khả năng hình thành cực phát triển, động lực phát triển, sức hấp dẫn đô thị và quản lý phát triển bền vững. Các cơ sở này được tổng hợp cùng kết quả nghiên cứu thực tiễn để hình thành các nhóm tiêu chí đề xuất.

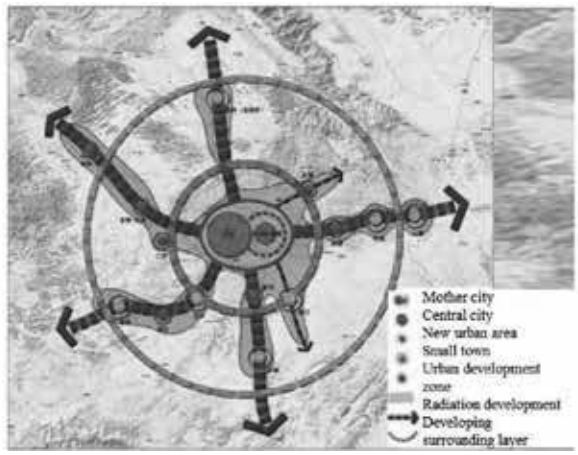
2.2.1. Vị trí trung tâm và khả năng tiếp cận

Lý thuyết vị trí trung tâm của Christaller (1933) cung cấp cơ sở quan trọng để xem xét sự hình thành và phân bố các trung tâm đô thị. Theo lý thuyết này, mỗi trung tâm có phạm vi phục vụ nhất định và được tổ chức trong một cấu trúc phân cấp. Đối với lựa chọn vị trí TTM, ba luận điểm có ý nghĩa trực tiếp gồm: (i) vị trí phải có đủ quy mô dân số phục vụ; (ii) khoảng cách giữa các trung tâm cần được tổ chức hợp lý; và (iii) TTM phải nằm trong mạng lưới trung tâm tổng thể của đô thị.

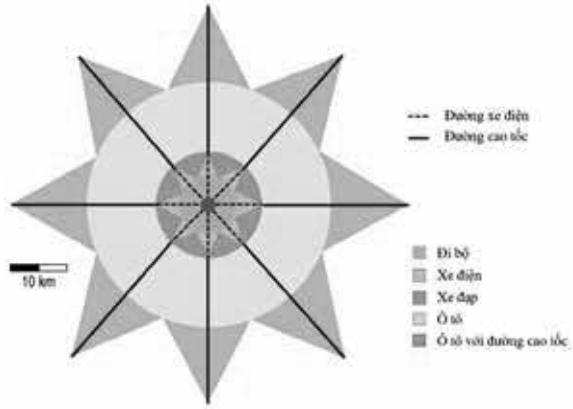
Trong điều kiện đô thị hiện đại, khoảng cách địa lý không phải yếu tố duy nhất quyết định khả năng hoạt động của một trung tâm. Khả năng tiếp cận phản ánh mức độ thuận lợi trong di chuyển giữa TTM với trung tâm đô thị lõi, khu vực dân cư, việc làm và các đầu mối giao thông chiến lược. Vì vậy, thời gian tiếp cận có ý nghĩa quan trọng hơn khoảng cách địa lý thuần túy; một TTM có thể nằm tương đối xa trung tâm lõi nhưng vẫn hoạt động hiệu quả nếu được kết nối bằng giao thông công cộng hoặc giao thông tốc độ cao (Alonso, 1964; Hall, 2002; OECD, 2012).



Hình 2. Mô hình vị trí trung tâm theo lý thuyết Christaller *Nguồn: Tác giả biên tập từ Christaller (1933)*



Quy hoạch cấu trúc không gian đô thị



Bán kính di chuyển trong 1 giờ theo các phương thức giao thông đô thị

Hình 3. Quan hệ giữa khoảng cách, thời gian tiếp cận và khả năng hình thành TTM.

Nguồn: Tác giả tổng hợp, biên tập từ Christaller (1933), Alonso (1964), Hall (2002), Hall & Pain (2006), OECD (2012, 2020), Antonova et al. (2019), UN-Habitat (2022), World Bank (2023) và kết quả nghiên cứu của tác giả (2025)

Kết quả nghiên cứu thực tiễn cho thấy khoảng cách phù hợp giữa TTM và trung tâm đô thị lõi đối với các đô thị loại I, II vùng Đồng bằng sông Hồng thường nằm trong khoảng 7 - 20 km, với thời gian tiếp cận không quá 30 phút (Trần Quý Dương, 2025). Đây là khoảng tham chiếu từ các trường hợp nghiên cứu, không phải ngưỡng cố định cho mọi đô thị. Khoảng cách quá ngắn có thể khiến TTM bị hòa nhập vào trung tâm hiện hữu và khó hình thành vai trò độc lập; ngược lại, khoảng cách quá lớn làm tăng chi phí đầu tư hạ tầng và giảm hiệu quả liên kết chức năng.

2.2.2. Quy mô và khả năng hình thành cực phát triển

Quy mô TTM cần được xem xét trong mối quan hệ giữa dân số, việc làm và phạm vi ảnh hưởng. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy các TTM thành công thường có quy mô dân số tương đối lớn và duy trì được sự cân bằng giữa nơi ở và việc làm (Alonso, 1964; Hall, 2002; OECD, 2020). Trong điều kiện Việt Nam, quy mô TTM cần được xem xét đồng thời với quy mô đô thị, tốc độ tăng trưởng dân số, khả năng tạo việc làm, quỹ đất phát triển và năng lực đầu tư hạ tầng. Do đó, quy mô trung tâm cần gắn với khả năng tạo việc làm và sức chứa hạ tầng để bảo đảm khả năng hình thành cực phát triển mới.

2.2.3. Động lực phát triển và sức hấp dẫn của TTM

TTM chỉ có khả năng hình thành và phát triển lâu dài khi có động lực phát triển đủ mạnh. Các động lực chủ yếu gồm kinh tế, hành chính, hạ tầng và xã hội, thể hiện qua khu công nghiệp, khu công nghệ cao, logistics, trung tâm thương mại, trung tâm hành chính, cảng biển, sân bay, đường cao tốc, đường sắt đô thị, nhu cầu nhà ở và chuyển dịch dân cư (Hall & Pain, 2006; Batty, 2013). Các động lực này tạo việc làm, thu hút đầu tư và góp phần hình thành cực tăng trưởng mới.

Bên cạnh động lực phát triển, sức hấp dẫn đô thị phản ánh khả năng thu hút dân cư, doanh nghiệp và nguồn lực đầu tư. Kết quả tổng hợp lý luận và điều tra xã hội học trong nghiên cứu xác định sáu nhóm yếu tố cấu thành sức hấp dẫn của TTM gồm: cơ hội việc làm; khả năng tiếp cận giao thông; chất lượng môi trường sống; giáo dục; y tế; và không gian công cộng, bản sắc đô thị. Trong đó, việc làm và giao thông là hai yếu tố có ảnh hưởng mạnh đến quyết định lựa chọn nơi cư trú của người dân (Antonova et al., 2019; Trần Quý Dương, 2025).

2.2.4. Quản lý phát triển và yêu cầu bền vững

Lựa chọn vị trí TTM không chỉ là vấn đề phân bố không gian mà còn gắn với khả năng quản lý và điều tiết quá trình phát triển. Các nội dung quan trọng gồm kiểm soát sử dụng đất, đầu tư hạ tầng chiến lược, phát triển giao thông công cộng, khuyến khích sử dụng đất hỗn hợp và bảo đảm cân bằng việc làm - nhà ở (UN-Habitat, 2022). Trong điều kiện Việt Nam, TTM cần được đặt trong tổng thể chiến lược phát triển đô thị, quy hoạch tỉnh và quy hoạch vùng nhằm bảo đảm tính đồng bộ và hiệu quả đầu tư.

Từ các cơ sở lý luận trên, lựa chọn vị trí TTM cần được xem xét theo hướng tích hợp giữa điều kiện nền, khả năng kết nối, động lực phát triển, sức hấp dẫn xã hội - môi trường và yêu cầu phát triển bền vững, thay vì dựa trên một yếu tố đơn lẻ.

Bảng 1. Cơ sở hình thành khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM

Nhóm tiêu chí	Nội dung chính	Cơ sở lý luận	Cơ sở thực tiễn
Điều kiện nền phát triển	Địa hình, địa chất, quỹ đất, khả năng mở rộng không gian, tài nguyên cảnh quan	Christaller (1933); Alonso (1964); Hall (2002)	Tổng hợp từ các trường hợp Bắc sông Cấm, Từ Sơn và Bãi Cháy
Kết nối giao thông	Khoảng cách đến trung tâm hiện hữu, thời gian tiếp cận, giao thông công cộng, kết nối liên vùng, tiếp cận đầu mối giao thông	Hall & Pain (2006); OECD (2012); OECD (2020)	Kết quả nghiên cứu thực tiễn tại các đô thị vùng Đồng bằng sông Hồng
Động lực phát triển kinh tế	Việc làm, thu hút đầu tư, ngành kinh tế chủ lực, động lực tăng trưởng	Hall & Pain (2006); Batty (2013); World Bank (2023)	Điều tra xã hội học và nghiên cứu trường hợp
Điều kiện xã hội - môi trường	Nhà ở, giáo dục, y tế, không gian xanh, chất lượng môi trường	Antonova et al. (2019); UN-Habitat (2022); World Bank (2023)	Điều tra xã hội học và đánh giá thực tiễn
Phát triển bền vững	TOD, hiệu quả sử dụng đất, cân bằng việc làm - nhà ở, Khả năng thích ứng và điều chỉnh phát triển, thích ứng biến đổi khí hậu	OECD (2020); UN-Habitat (2022); World Bank (2023)	Tổng hợp từ nghiên cứu lý luận và thực tiễn quy hoạch đô thị

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ Christaller (1933), Alonso (1964), Hall (2002), Hall & Pain (2006), OECD (2012, 2020), Antonova et al. (2019), UN-Habitat (2022), World Bank (2023) và kết quả nghiên cứu của tác giả (2025).

Từ cơ sở lý luận và kết quả nghiên cứu thực tiễn, nghiên cứu xác định năm nhóm tiêu chí có vai trò chủ yếu trong lựa chọn vị trí TTM, gồm: điều kiện nền phát triển; kết nối giao thông; động lực phát triển kinh tế; điều kiện xã hội - môi trường; và phát triển bền vững. Các nhóm này được cụ thể hóa thành các tiêu chí thành phần trên cơ sở phân tích các trường hợp nghiên cứu tại vùng Đồng bằng sông Hồng.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng cách tiếp cận tổng hợp giữa phân tích lý luận và nghiên cứu thực tiễn nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng và xây dựng khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM. Quy trình gồm bốn bước: (1) tổng hợp và phân tích cơ sở lý luận; (2) nghiên cứu kinh nghiệm quốc tế và các trường hợp thực tiễn tại vùng Đồng bằng sông Hồng; (3) tổng hợp, so sánh và xác định các nhóm yếu tố ảnh hưởng; và (4) xây dựng khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM.

Năm phương pháp được sử dụng gồm:

(1) Tổng hợp và phân tích tài liệu: hệ thống hóa các lý thuyết về đô thị ĐTT, vị trí trung tâm, khả năng tiếp cận, sức hấp dẫn đô thị và phát triển bền vững từ các nghiên cứu trong nước và quốc tế.

(2) Nghiên cứu trường hợp: phân tích ba TTM điển hình tại Hải Phòng, Bắc Ninh và Hạ Long nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hình thành và phát triển TTM trong điều kiện Việt Nam.

(3) Điều tra xã hội học: tổng hợp kết quả khảo sát về mức độ hấp dẫn của TTM đối với người dân và nhà đầu tư, đồng thời đối chiếu với các kết quả nghiên cứu quốc tế.

(4) So sánh và phân tích tổng hợp: xác định những điểm tương đồng và khác biệt giữa các trường hợp nghiên cứu, từ đó nhận diện các nhóm yếu tố ảnh hưởng chủ yếu.

(5) Tổng hợp và xây dựng khung tiêu chí: kết hợp kết quả lý luận và thực tiễn để xây dựng khung gồm năm nhóm và 25 tiêu chí thành phần phục vụ lựa chọn vị trí TTM. Khung tiêu chí ở giai đoạn này mang tính định tính và được sử dụng như công cụ hỗ trợ đánh giá trong lập quy hoạch; việc xác định trọng số và lượng hóa bằng AHP, GIS-MCDA hoặc các phương pháp định lượng khác được xác định là hướng nghiên cứu tiếp theo.

3. CƠ SỞ THỰC TIỄN VÀ PHÂN TÍCH CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN LỰA CHỌN VỊ TRÍ TTM

3.1. Kinh nghiệm phát triển TTM trên thế giới

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy quá trình hình thành TTM thường gắn với chiến lược tái cấu trúc không gian đô thị và hình thành các cực tăng trưởng mới. Sự thành công của TTM không phụ thuộc vào một yếu tố riêng lẻ mà là kết quả của sự kết hợp giữa khả năng kết nối giao thông, động lực phát triển kinh tế, sức hấp dẫn đô thị, chất lượng môi trường sống và năng lực quản lý phát triển (Hall & Pain, 2006; OECD, 2020; UN-Habitat, 2022).

Từ các trường hợp tại Vương quốc Anh, Pháp, Nhật Bản và Hàn Quốc, có thể rút ra bốn bài học chủ yếu: (i) TTM cần gắn với các hành lang phát triển và mạng lưới giao thông chiến lược; (ii) cần có ít nhất một động lực phát triển chủ đạo như hành chính, công nghiệp, logistics, đổi mới sáng tạo hoặc du lịch; (iii) hạ tầng kỹ thuật và hạ tầng xã hội cần được đầu tư đồng bộ với quá trình phát triển; và (iv) quản lý phát triển có vai trò quan trọng trong bảo đảm liên kết chức năng giữa TTM và trung tâm hiện hữu.

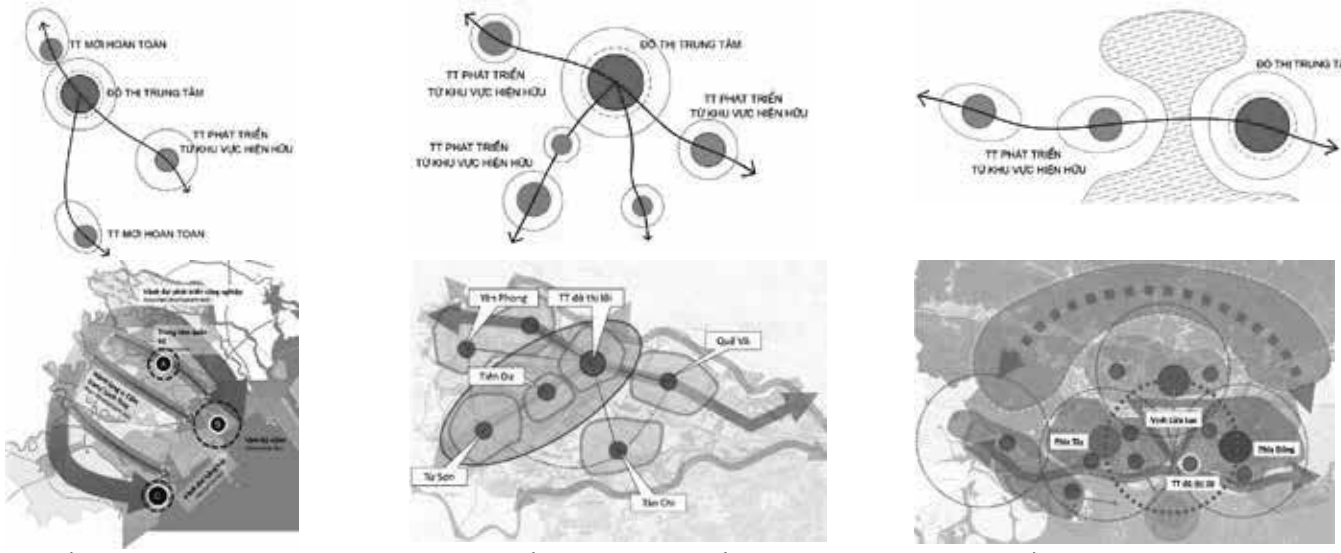
3.2. Thực tiễn phát triển TTM tại các đô thị nghiên cứu

Để làm rõ các yếu tố ảnh hưởng trong điều kiện Việt Nam, nghiên cứu lựa chọn ba trường hợp tại vùng Đồng bằng sông Hồng gồm Bắc sông Cấm (Hải Phòng), Từ Sơn (Bắc Ninh) và Bãi Cháy (Hạ Long). Ba trường hợp đại diện cho các động lực phát triển khác nhau, lần lượt là hành chính, công nghiệp và du lịch - dịch vụ, qua đó cho phép so sánh vai trò của các nhóm yếu tố trong quá trình hình thành TTM.

Bảng 2. Tổng hợp kinh nghiệm quốc tế về phát triển TTM

Quốc gia	TTM tiêu biểu	Động lực phát triển	Bài học rút ra
Vương quốc Anh	Milton Keynes	Đô thị mới, giao thông	Gắn với mạng lưới giao thông tốc độ cao
Pháp	La Défense	Tài chính - thương mại	Phát triển chức năng chuyên biệt
Nhật Bản	Tama New Town	Đường sắt đô thị	Phát triển theo hành lang TOD
Hàn Quốc	Bundang, Ilsan	Nhà ở - việc làm	Cân bằng giữa phát triển dân cư và việc làm

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ Hall (2002), Hall & Pain (2006), OECD (2012), OECD (2020), UN-Habitat (2022).



Cấu trúc ĐTT của TP Hải Phòng *Cấu trúc ĐTT của TP Bắc Ninh* *Cấu trúc ĐTT của TP Hạ Long*

Hình 4. Vị trí các đô thị nghiên cứu và các TTM điển hình vùng Đồng bằng sông Hồng. *Nguồn: Tác giả tổng hợp từ dữ liệu nghiên cứu và các đồ án quy hoạch đô thị của Hải Phòng, Bắc Ninh và Hạ Long*

3.2.1. Trung tâm mới Bắc sông Cấm - Hải Phòng

Bắc sông Cấm được xác định là trung tâm hành chính - chính trị mới của TP Hải Phòng, là trường hợp điển hình về sử dụng động lực hành chính để thúc đẩy hình thành TTM. Khu vực có quỹ đất phát triển lớn, địa hình tương đối thuận lợi và nằm gần trung tâm đô thị hiện hữu; khoảng cách khoảng 5 - 7 km cùng hệ thống cầu và đường đô thị tạo điều kiện thuận lợi cho kết nối với khu vực lõi.

Việc di chuyển các cơ quan hành chính cấp thành phố đã tạo động lực phát triển, thúc đẩy hình thành các khu đô thị mới, thương mại - dịch vụ và các hoạt động kinh tế hỗ trợ. Trường hợp Bắc sông Cấm cho thấy động lực hành chính có thể tạo hiệu ứng lan tỏa mạnh khi được hỗ trợ bởi quỹ đất thuận lợi và hệ thống giao thông kết nối hiệu quả. Tuy nhiên, để duy trì vai trò của một TTM, động lực hành chính cần đi cùng sự phát triển đồng bộ của nhà ở, thương mại và dịch vụ.

3.2.2. Trung tâm mới Từ Sơn – Bắc Ninh

Từ Sơn có tốc độ đô thị hóa cao và giữ vai trò kết nối giữa Bắc Ninh với vùng Thủ đô Hà Nội. Khác với Bắc sông Cấm, động lực phát triển chủ yếu của Từ Sơn đến từ công nghiệp hóa và liên kết vùng. Sự phát triển của các khu công nghiệp cùng hệ thống giao thông kết nối thuận lợi với Hà Nội đã tạo điều kiện hình thành một trung tâm công nghiệp - dịch vụ quan trọng.

Khoảng cách khoảng 14 km tới trung tâm thành phố Bắc Ninh cho phép Từ Sơn duy trì mức độ tương đối độc lập nhưng vẫn bảo đảm liên kết với đô thị lõi. Trường hợp này cho thấy động lực công nghiệp kết hợp với khả năng kết nối vùng có thể tạo điều kiện hình thành một cực tăng trưởng mới có tính cạnh tranh.

3.2.3. Trung tâm mới Bãi Cháy - Hạ Long

Bãi Cháy là trường hợp có động lực phát triển chủ yếu từ du lịch và dịch vụ. Lợi thế về cảnh quan thiên nhiên, vị trí ven biển và hệ thống hạ tầng du lịch tạo điều kiện để khu vực trở thành một trung tâm phát triển mới của Hạ Long. Sự xuất hiện của cầu Bãi Cháy và các tuyến giao thông kết nối vùng làm thay đổi đáng kể khả năng tiếp cận, qua đó hỗ trợ phát triển thương mại, dịch vụ và du lịch chất lượng cao.

Kết quả điều tra xã hội học (Trần Quý Dương, 2025) cho thấy Bãi Cháy có mức độ hấp dẫn cao đối với người dân và nhà đầu tư nhờ môi trường sống, cảnh quan và cơ hội phát triển kinh tế. Trường hợp này cho thấy sức hấp dẫn cảnh quan và chất lượng môi trường có thể trở thành động lực phát triển quan trọng bên cạnh các động lực kinh tế truyền thống, đồng thời khẳng định sự cần thiết phải xem xét đồng thời các yếu tố kinh tế, xã hội và môi trường khi lựa chọn vị trí TTM.

3.3. So sánh các trường hợp nghiên cứu

Từ ba trường hợp trên có thể nhận thấy các TTM có động lực hình thành khác nhau nhưng cùng phụ thuộc vào một số điều kiện nền tảng, đặc biệt là khả năng kết nối, thu hút đầu tư và dân cư, quỹ đất và chất lượng môi trường. Mức độ quan trọng của từng yếu tố thay đổi theo đặc điểm và chức năng của từng TTM.

Bảng 3. So sánh các yếu tố ảnh hưởng đến sự phát triển của các TTM nghiên cứu

Tiêu chí	Bắc sông Cấm (Hải Phòng)	Từ Sơn (Bắc Ninh)	Bãi Cháy (Hạ Long)
Động lực phát triển chủ đạo	Hành chính	Công nghiệp	Du lịch
Khả năng kết nối	Cao	Rất cao	Cao
Điều kiện quỹ đất	Thuận lợi	Khá thuận lợi	Hạn chế
Khả năng thu hút đầu tư	Cao	Rất cao	Cao
Khả năng thu hút dân cư	Cao	Cao	Rất cao
Tiềm năng mở rộng	Cao	Cao	Trung bình
Chất lượng môi trường	Khá	Khá	Rất cao

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ kết quả nghiên cứu thực tiễn (2025).

3.4. Các yếu tố hấp dẫn của TTM

Sức hấp dẫn của TTM có vai trò quan trọng trong việc thu hút dân cư và đầu tư. Kết quả điều tra xã hội học cho thấy mức độ ưu tiên các yếu tố có khác biệt giữa các đô thị nhưng hình thành một số xu hướng chung. Các yếu tố được đánh giá cao gồm cơ hội việc làm, khả năng tiếp cận giao thông, chất lượng môi trường sống, hệ thống giáo dục và y tế, không gian công cộng và cảnh quan đô thị. Trong đó, việc làm và giao thông có ảnh hưởng mạnh đến quyết định lựa chọn nơi cư trú và nơi làm việc (Antonova et al., 2019; OECD, 2020).

Bên cạnh việc làm và giao thông, chất lượng môi trường sống ngày càng có vai trò quan trọng khi người dân có xu hướng ưu tiên các khu vực có không gian xanh, môi trường trong lành và chất lượng dịch vụ đô thị cao. Điều này bổ sung cho các yếu tố kinh tế và hạ tầng trong đánh giá khả năng thu hút của TTM.

3.5. Tổng hợp các yếu tố ảnh hưởng đến lựa chọn vị trí TTM

Kết quả tổng hợp cơ sở lý luận và phân tích các trường hợp nghiên cứu cho thấy lựa chọn vị trí TTM là kết quả của sự tác động đồng thời của nhiều nhóm yếu tố, trong đó mức độ quan trọng có thể thay đổi tùy theo chức năng và động lực phát triển của từng đô thị.

- Thứ nhất, điều kiện nền phát triển quyết định khả năng triển khai đầu tư, hình thành không gian đô thị và mở rộng TTM trong dài hạn. Các yếu tố về địa hình, địa chất, quỹ đất, khả năng mở rộng và tài nguyên cảnh quan tạo nên những điều kiện ban đầu cho quá trình phát triển.

- Thứ hai, kết nối giao thông và khả năng tiếp cận là điều kiện bảo đảm liên kết chức năng giữa TTM với trung tâm hiện hữu, các khu dân cư, việc làm và mạng lưới đô thị vùng. Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian tiếp cận và khả năng kết nối có ý nghĩa quan trọng hơn khoảng cách địa lý đơn thuần.

- Thứ ba, động lực phát triển kinh tế tạo việc làm, thu hút đầu tư và thúc đẩy hình thành cực tăng trưởng mới. Động lực này có thể xuất phát từ hành chính, công nghiệp, logistics, du lịch - dịch vụ hoặc các ngành kinh tế chủ lực của từng đô thị.

- Thứ tư, điều kiện xã hội - môi trường quyết định sức hấp dẫn của TTM đối với dân cư và doanh nghiệp, thông qua nhà ở, giáo dục, y tế, không gian xanh và chất lượng môi trường sống.

- Thứ năm, yêu cầu phát triển bền vững ngày càng có vai trò quan trọng, bao gồm sử dụng đất hiệu quả, phát triển theo định hướng giao thông công cộng (TOD), cân bằng việc làm - nhà ở và thích ứng với biến đổi khí hậu.

Từ kết quả trên, nghiên cứu xác định năm nhóm yếu tố làm cơ sở trực tiếp để xây dựng khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM ở phần tiếp theo.

4. ĐỀ XUẤT KHUNG TIÊU CHÍ LỰA CHỌN VỊ TRÍ TTM

4.1. Cơ sở xây dựng khung tiêu chí

Khung tiêu chí được xây dựng trên cơ sở tích hợp bốn nguồn thông tin chính: (1) hệ thống lý luận về đô thị ĐTT, lý thuyết vị trí trung tâm, khả năng tiếp cận, sức hấp dẫn đô thị và phát triển bền vững; (2) kinh nghiệm phát triển TTM tại một số quốc gia; (3) kết quả phân tích ba trường hợp nghiên cứu tại Hải Phòng, Bắc Ninh và Hạ

Long; và (4) kết quả điều tra xã hội học cùng tổng hợp đánh giá của tác giả. Cách tiếp cận này nhằm bảo đảm khung tiêu chí có cơ sở khoa học, đồng thời phản ánh đặc điểm phát triển đô thị Việt Nam và khả năng vận dụng trong thực tiễn lập quy hoạch.

4.2. Nguyên tắc lựa chọn vị trí TTM

Từ các kết quả nghiên cứu, khung tiêu chí được xây dựng theo năm nguyên tắc cơ bản:

- Thứ nhất, phù hợp với cấu trúc phát triển đô thị và định hướng phát triển vùng. Vị trí TTM cần được xem xét trong mối quan hệ với mạng lưới đô thị, các hành lang phát triển kinh tế và hệ thống kết cấu hạ tầng của đô thị và vùng.

- Thứ hai, ưu tiên khả năng kết nối và tiếp cận. Thời gian tiếp cận giữa TTM với trung tâm hiện hữu có ý nghĩa quan trọng hơn khoảng cách địa lý tuyệt đối; đồng thời cần bảo đảm kết nối với các đầu mối giao thông chiến lược và mạng lưới giao thông công cộng.

- Thứ ba, gắn với các động lực phát triển dài hạn. TTM cần được hỗ trợ bởi một hoặc một số động lực đủ mạnh như công nghiệp, logistics, dịch vụ, đổi mới sáng tạo, giáo dục, du lịch hoặc chức năng hành chính, qua đó tạo việc làm, thu hút đầu tư và hình thành cực phát triển mới.

- Thứ tư, bảo đảm cân bằng giữa phát triển kinh tế, xã hội và môi trường. Lựa chọn vị trí cần đồng thời xem xét khả năng tạo việc làm, phát triển nhà ở, chất lượng môi trường sống và khả năng cung cấp các dịch vụ xã hội thiết yếu.

- Thứ năm, hướng tới phát triển bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu. Vị trí TTM cần phù hợp với yêu cầu sử dụng đất hiệu quả, phát triển theo định hướng giao thông công cộng (TOD), cân bằng việc làm – nhà ở và tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu.

4.3. Khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM

Trên cơ sở các nguyên tắc nêu trên, nghiên cứu đề xuất khung tiêu chí gồm **năm nhóm và 25 tiêu chí thành phần**, nhằm đánh giá tương đối toàn diện các điều kiện hình thành và phát triển TTM. Năm nhóm tiêu chí gồm: (1) Điều kiện nền phát triển; (2) Kết nối giao thông; (3) Động lực phát triển kinh tế; (4) Điều kiện xã hội - môi trường; và (5) Phát triển bền vững.

Bảng 4. Khung tiêu chí lựa chọn vị trí TTM đề xuất

Nhóm tiêu chí	Mục tiêu đánh giá	Các tiêu chí thành phần
1. Điều kiện nền phát triển	Đánh giá khả năng phát triển lâu dài của khu vực	Địa hình; Địa chất; Quỹ đất; Khả năng mở rộng không gian; Tài nguyên cảnh quan
2. Kết nối giao thông	Đánh giá khả năng tiếp cận và liên kết không gian	Khoảng cách đến trung tâm hiện hữu; Thời gian tiếp cận; Giao thông công cộng; Kết nối liên vùng; Tiếp cận đầu mối giao thông
3. Động lực phát triển kinh tế	Đánh giá khả năng hình thành cực tăng trưởng	Nhân tố tạo thị; Việc làm; Thu hút đầu tư; Ngành kinh tế chủ lực; Đóng góp tăng trưởng
4. Điều kiện xã hội - môi trường	Đánh giá sức hấp dẫn đô thị	Nhà ở; Giáo dục; Y tế; Không gian xanh; Chất lượng môi trường
5. Phát triển bền vững	Đánh giá khả năng phát triển dài hạn	TOD; Hiệu quả sử dụng đất; Cân bằng việc làm - nhà ở; Khả năng thích ứng và điều chỉnh phát triển; Thích ứng biến đổi khí hậu

Nguồn: Tác giả đề xuất trên cơ sở tổng hợp lý luận và kết quả nghiên cứu thực tiễn



Hình 5. Khung tiêu chí đánh giá lựa chọn vị trí TTM. *Nguồn: Tác giả xây dựng trên cơ sở tổng hợp lý luận và kết quả nghiên cứu thực tiễn*

4.4. Cấu trúc và ý nghĩa của khung tiêu chí

Khung tiêu chí gồm năm nhóm có mối quan hệ tương hỗ, lần lượt phản ánh điều kiện nền tảng, khả năng kết nối, động lực phát triển, sức hấp dẫn đô thị và tính bền vững của TTM. Các nhóm tiêu chí không được xem là những bước tuần tự mà cần được đánh giá tương đối đồng thời khi xem xét một phương án vị trí. Vì vậy, khung có thể được sử dụng để đánh giá tổng hợp và so sánh các phương án vị trí TTM, thay vì áp dụng theo phương thức loại trừ từng tiêu chí riêng lẻ.

4.5. Khả năng lượng hóa và vận dụng khung tiêu chí

Khung tiêu chí hiện mang tính định tính, nhằm hệ thống hóa các yếu tố cần xem xét khi lựa chọn vị trí TTM. Tùy đặc điểm và định hướng phát triển của từng đô thị, các tiêu chí có thể được lượng hóa và xác định trọng số phù hợp. Các phương pháp đánh giá đa tiêu chí như AHP, ANP hoặc GIS-MCDA có thể được sử dụng trong các nghiên cứu tiếp theo để xây dựng mô hình đánh giá và so sánh các phương án vị trí.

5. THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy lựa chọn vị trí TTM trong cấu trúc đô thị ĐTT cần được xem xét tổng hợp giữa điều kiện không gian, kết nối giao thông, động lực kinh tế, điều kiện xã hội - môi trường và phát triển bền vững, thay vì chủ yếu dựa vào khả năng mở rộng quỹ đất hoặc khoảng cách đến trung tâm hiện hữu. Kết quả này phù hợp với quan điểm của Hall và Pain (2006), OECD (2020) và UN-Habitat (2022) về vai trò của các cực phát triển có liên kết chức năng trong cấu trúc đô thị ĐTT.

Một kết quả đáng chú ý là khả năng tiếp cận có ý nghĩa quan trọng hơn khoảng cách địa lý đơn thuần. Vì vậy, khoảng cách đến trung tâm hiện hữu cần được xem xét đồng thời với thời gian tiếp cận, giao thông công cộng, kết nối liên vùng và khả năng tiếp cận các đầu mối giao thông. Kết quả này cũng phù hợp với định hướng phát triển đô thị theo giao thông công cộng (TOD).

Nghiên cứu đề xuất khung tích hợp 5 nhóm và 25 tiêu chí thành phần, trên cơ sở kết hợp lý luận quốc tế với thực tiễn tại Hải Phòng, Bắc Ninh và Hạ Long. Đóng góp chính không nằm ở việc đưa ra một tiêu chí hoàn toàn mới, mà ở việc tích hợp các nhóm yếu tố thường được xem xét phân tán thành một khung thống nhất, có khả năng vận dụng trong điều kiện đô thị Việt Nam.

Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cũng cho thấy không có một cấu hình tiêu chí và trọng số cố định cho mọi TTM. Do động lực hình thành và chức năng của Bắc sông Cấm, Từ Sơn và Bãi Cháy khác nhau, mức độ ưu tiên của từng tiêu chí cần được điều chỉnh theo điều kiện không gian, chức năng dự kiến và định hướng phát triển của từng đô thị.

Khung tiêu chí có thể được sử dụng để nhận diện, đánh giá và so sánh các phương án vị trí TTM trong lập quy hoạch chung đô thị, quy hoạch tỉnh và quy hoạch vùng. Tuy nhiên, khung hiện mới ở dạng định tính, chưa xác định trọng số và thang điểm nên chưa cho phép đánh giá định lượng mức độ phù hợp giữa các phương án. Các nghiên cứu tiếp theo cần lượng hóa các tiêu chí, xác định trọng số bằng các phương pháp như AHP, ANP hoặc GIS-MCDA và kiểm chứng trên phạm vi rộng hơn tại các đô thị và vùng khác của Việt Nam.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã làm rõ cơ sở lý luận và thực tiễn của việc lựa chọn vị trí TTM trong cấu trúc đô thị ĐTT thông qua phân tích ba trường hợp tại vùng Đồng bằng sông Hồng gồm Bắc sông Cấm (Hải Phòng), Từ Sơn (Bắc Ninh) và Bãi Cháy (Hạ Long). Kết quả cho thấy khả năng hình thành và phát triển TTM chịu tác động tổng hợp của điều kiện nền, kết nối giao thông, động lực phát triển, điều kiện xã hội - môi trường và yêu cầu phát triển bền vững.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất khung tiêu chí gồm 5 nhóm và 25 tiêu chí thành phần, làm cơ sở hệ thống hóa và đánh giá các điều kiện cần xem xét khi lựa chọn vị trí TTM trong quá trình lập quy hoạch đô thị. Khung tiêu chí nhấn mạnh mối quan hệ giữa vị trí, khả năng tiếp cận, động lực phát triển, sức hấp dẫn đô thị và tính bền vững, đồng thời cho phép điều chỉnh mức độ ưu tiên theo chức năng và điều kiện cụ thể của từng đô thị.

Về thực tiễn, khung tiêu chí có thể hỗ trợ nhận diện, đánh giá và so sánh các phương án vị trí TTM trong lập quy hoạch chung đô thị, quy hoạch tỉnh và quy hoạch vùng. Tuy nhiên, nghiên cứu mới dừng ở việc xây dựng khung định tính, chưa xác định trọng số và thang điểm cho các tiêu chí. Các nghiên cứu tiếp theo cần lượng hóa khung tiêu chí, kiểm chứng trên phạm vi rộng hơn và phát triển các mô hình đánh giá đa tiêu chí phù hợp với điều kiện đô thị Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 06-NQ/TW ngày 24/01/2022 về quy hoạch, xây dựng, quản lý và phát triển bền vững đô thị Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, Hà Nội, 2022.

[2] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15, được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 144/2025/QH15, Hà Nội, 2024.

[3] Quốc hội. Luật Đất đai số 31/2024/QH15, Hà Nội, 2024.

[4] Chính phủ. Quy hoạch tổng thể quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Hà Nội, 2024.

[5] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 về phân loại đô thị, Hà Nội, 2025.

[6] Trần Quý Dương. Quy hoạch phát triển trung tâm mới trong mô hình đô thị đa trung tâm vùng Đồng bằng sông Hồng. Luận án Tiến sĩ Quy hoạch, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2025.

[7] Alonso, W. Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1964.

[8] Antonova, N., et al. Polycentric Urban Development and Urban Attractiveness. Sustainability, vol. 11, no. 20, pp. 1-18, 2019.

[9] Batty, M. The New Science of Cities. MIT Press, Cambridge, MA, 2013.

[10] Christaller, W. Die zentralen Orte in Süddeutschland: Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen. Gustav Fischer, Jena, 1933.

[11] ESPON. Territorial Development and Polycentricity. European Observation Network for Territorial Development and Cohesion, Luxembourg, 2021.

[12] Hall, P. Urban and Regional Planning (4th ed.). Routledge, London, 2002.

[13] Hall, P., & Pain, K. (Eds.). The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe. Earthscan, London, 2006.

[14] Meijers, E. Measuring Polycentricity and Its Promises. European Planning Studies, vol. 16, no. 9, pp. 1313-1323, 2008.

[15] OECD. Redefining "Urban": A New Way to Measure Metropolitan Areas. OECD Publishing, Paris, 2012.

[16] OECD/European Commission. Cities in the World: A New Perspective on Urbanisation. OECD Publishing, Paris, 2020.

[17] UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi, 2022.

[18] World Bank. Thriving: Making Cities Green, Resilient and Inclusive in a Changing Climate. World Bank, Washington, DC, 2023.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 10/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Hành lang di sản Đông - Tây trong định hướng phát triển xanh và bền vững tỉnh Đắk Lắk

The East - West heritage corridor in the green and sustainable development orientation of Dak Lak Province

> TS.KTS LÊ ĐÀM NGỌC TÚ*, THS.KTS TRẦN THANH QUÝ
Khoa Kiến trúc, Trường Đại học Xây dựng Miền Trung
*Email: ledamngoctu@muce.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhận diện cấu trúc không gian văn hóa - di sản và đề xuất Hành lang di sản Đông - Tây cho tỉnh Đắk Lắk sau sắp xếp đơn vị hành chính năm 2025. Trên cơ sở nghiên cứu trường hợp, phân tích tài liệu quy hoạch, khảo sát thực địa và phân loại tài nguyên di sản, bài báo xác lập ba vùng văn hóa gồm vùng Tây Nguyên, vùng duyên hải và vùng chuyển tiếp Đông - Tây. Kết quả đề xuất mô hình Hành lang di sản với chủ đề "Biển - Rừng - Tây Nguyên", kết nối các tài nguyên tự nhiên, văn hóa, làng nghề và đô thị dọc trục Quốc lộ 29 và các tuyến giao thông liên quan. Nghiên cứu đồng thời sử dụng tương tác Đất liền - Biển như khung quản trị môi trường của hành lang, qua đó nhận diện mối liên hệ giữa hoạt động phát triển ở thượng nguồn với hệ sinh thái, sinh kế và du lịch ven biển. Khung đề xuất nhấn mạnh cơ chế điều phối liên ngành, vùng bảo vệ di sản, giám sát chung và sự tham gia của cộng đồng. Kết quả cung cấp định hướng ban đầu để tích hợp bảo tồn di sản, phát triển du lịch và quản lý môi trường trong quy hoạch tỉnh.

Từ khóa: Hành lang di sản; tương tác Đất liền - Biển; quản trị tích hợp; phát triển xanh; Đắk Lắk.

ABSTRACT

This study identifies the cultural and heritage spatial structure and proposes an East–West Heritage Corridor for Dak Lak Province following the 2025 administrative reorganization. Using a case-study approach, planning-document analysis, field observation, and heritage-resource classification, the research defines three cultural zones: the Central Highlands, the coastal zone, and the East-West transition zone. Its principal outcome is a "Sea-Forest-Highlands" heritage-corridor model that links natural assets, cultural heritage, traditional crafts, and urban centers along National Highway 29 and related transport routes. Land–Sea Interaction is employed as the environmental-governance framework for the corridor, clarifying how upstream development affects downstream ecosystems, livelihoods, and coastal tourism. The proposed framework emphasizes intersectoral coordination, heritage protection and buffer zones, shared monitoring, and community participation. The findings provide an initial basis for integrating heritage conservation, tourism development, and environmental management into provincial planning.

Keywords: Heritage corridor; land-sea interaction; integrated governance; green development; Dak Lak.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh kinh tế xanh và kinh tế số, việc tổ chức lại không gian phát triển nhằm phát huy hiệu quả các giá trị tự nhiên và văn hóa ngày càng trở nên cần thiết. Việc sắp xếp đơn vị hành chính và tổ chức mô hình chính quyền địa phương hai cấp năm 2025 đã tạo ra những thay đổi quan trọng trong quản trị và quy hoạch lãnh thổ tại Việt Nam.

Việc hợp nhất Đắk Lắk và Phú Yên thành tỉnh Đắk Lắk mới hình thành một không gian phát triển liên hoàn từ Tây Nguyên đến duyên hải, tạo điều kiện kết nối vùng nguyên liệu, đô thị, cảng biển, cửa khẩu và các hệ thống di sản [1, 2]. Sự bổ trợ giữa cảnh quan, văn hóa Tây Nguyên ở phía Tây với hệ sinh thái biển, di sản Chăm Pa và văn hóa làng biển phía Đông tạo cơ sở hình thành một hệ thống văn hóa - sinh thái liên vùng.

Tuy nhiên, quá trình phát triển công nghiệp, đô thị, cảng biển, giao thông và nông nghiệp có thể gia tăng áp lực lên lưu vực, hệ sinh thái ven biển và cảnh quan di sản. Cách tiếp cận quy hoạch theo ngành hoặc từng tiểu vùng riêng biệt khó giải quyết hiệu quả các tác động môi trường và phát triển có tính liên vùng.

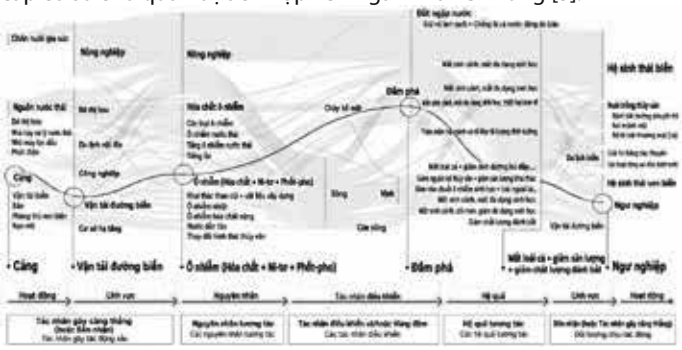
Với định hướng tăng trưởng xanh và phát triển bền vững, tỉnh Đắk Lắk cần khai thác hài hòa tài nguyên văn hóa - cảnh quan gắn với bảo vệ môi trường và thích ứng biến đổi khí hậu. Trong bối cảnh đó, Hành lang di sản có thể đóng vai trò cấu trúc không gian kết nối các tài nguyên văn hóa - tự nhiên, trong khi tương tác Đất liền - Biển (LSI) cung cấp khung quản trị các tác động từ thượng nguồn đến ven biển. Sự kết hợp hai cách tiếp cận cho phép chuyển từ bảo tồn các điểm di sản riêng lẻ sang quản trị một hệ thống văn hóa - sinh thái liên vùng [3 - 5].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung: (i) nhận diện cấu trúc không gian văn hóa - di sản của tỉnh Đắk Lắk sau sắp xếp; (ii) đề xuất mô hình Hành lang di sản Đông - Tây kết nối các tài nguyên tự nhiên và văn hóa đặc trưng; và (iii) xây dựng khung quản trị tích hợp dựa trên LSI nhằm hài hòa giữa phát triển kinh tế, bảo tồn di sản và bảo vệ môi trường.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Quản lý tích hợp gắn với tương tác Đất liền - Biển

Lý thuyết về Tương tác Đất liền - Biển (Land-Sea Interactions - LSI) xem vùng ven biển như một hệ thống tương tác giữa các quá trình tự nhiên và hoạt động con người từ lưu vực thượng nguồn đến biển. Các hoạt động sử dụng đất, nông nghiệp, đô thị, công nghiệp và và phát triển hạ tầng ở sâu trong đất liền có thể làm thay đổi dòng chảy, trầm tích và chất lượng nước, qua đó ảnh hưởng đến hệ sinh thái, nuôi trồng thủy sản, du lịch và sinh kế ven biển. Vì vậy LSI cung cấp cơ sở cho quản trị tích hợp liên ngành và liên vùng [3].



Hình 1. Các yếu tố và cấu trúc tương tác Đất liền - Biển qua ví dụ hoạt động cảng [3]

2.2. Lý thuyết Hành lang di sản

Hành lang di sản (Heritage Corridor) là cách tiếp cận bảo tồn và phát huy cảnh quan văn hóa theo tuyến, liên kết các điểm di sản với cảnh quan, tuyến hành trình, hoạt động kinh tế và hệ thống diễn giải. Bốn thành phần cơ bản trong xây dựng một hành lang di sản bao gồm: các đường xanh (greenways), các tuyến hành trình (travel routes), các di sản (heritages) và một hệ thống diễn giải (interpretation system). Quy trình xây dựng thường bao gồm: xác định chủ đề và ranh giới; kiểm kê, phân loại và đánh giá tài nguyên; lập quy hoạch và thiết kế dự án (thiết lập các mục tiêu bảo tồn di sản, xác định các dự án liên quan, hệ thống tổ chức giao thông, cũng như hệ thống diễn giải và giáo dục); tổ chức quản lý; và theo dõi tác động [4 - 6].



Hình 2. Quy trình xây dựng và quản lý hành lang di sản *(biên tập từ [4])*

Trong nghiên cứu này, Hành lang di sản được sử dụng để tổ chức không gian kết nối các tài nguyên văn hóa - tự nhiên, còn LSI là khung quản trị môi trường của hành lang. Cách kết hợp này cho phép xem xét đồng thời giá trị của các điểm đến, tính liên tục của tuyến trải nghiệm và các áp lực môi trường có thể lan truyền từ thượng nguồn xuống hạ lưu.

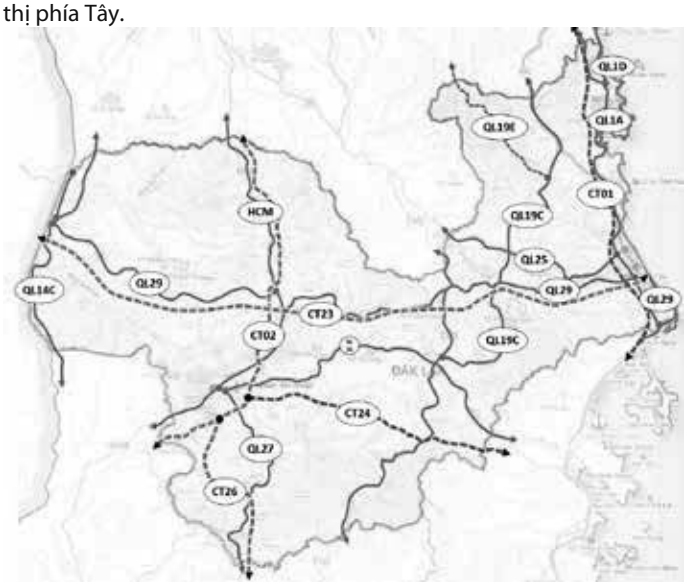
3. PHẠM VI, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Phạm vi nghiên cứu

Theo Nghị quyết số 202/2025/QH15 ngày 12/6/2025, tỉnh Đắk Lắk mới được hình thành trên cơ sở sắp xếp tỉnh Đắk Lắk và Phú Yên, có diện tích 18.096,40 km^2 và dân số 3.346.853 người [1]. Tỉnh tiếp giáp các tỉnh Gia Lai, Khánh Hòa, Lâm Đồng, Campuchia và Biển Đông, tạo không gian liên kết từ cao nguyên đến duyên hải.

Hệ thống giao thông của tỉnh hình thành các trục Bắc - Nam và Đông - Tây, trong đó Quốc lộ 29 và mạng lưới cao tốc giữ vai trò quan trọng trong kết nối duyên hải - cao nguyên. Theo quy hoạch mạng lưới đường bộ quốc gia, các tuyến chính gồm: Đường cao tốc Bắc - Nam phía Đông (CT.01), Bắc - Nam phía Tây (CT.02), Phú Yên - Đắk Lắk (CT.23), Khánh Hòa - Buôn Ma Thuột (CT.24) và Liên Khương - Buôn Ma Thuột (CT.26) Hình 3 [7].

Phạm vi nghiên cứu gồm ba hành lang chính: Bắc - Nam phía Đông, Bắc - Nam phía Tây và Đông - Tây. Khảo sát chi tiết tập trung vào khu vực duyên hải Phú Yên cũ và các điểm di sản dọc Quốc lộ 29; đồng thời mở rộng phân tích trên toàn tỉnh để làm rõ mối liên kết giữa di sản ven biển với các không gian sinh thái, văn hóa và đô thị phía Tây.



Hình 3. Hệ thống giao thông kết nối chính của tỉnh Đắk Lắk *(Nguồn [8])*

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp nghiên cứu trường hợp, kết hợp: (i) tổng hợp cơ sở lý thuyết về LSI và Hành lang di sản; (ii) phân tích văn bản pháp lý, tài liệu quy hoạch và nguồn thứ cấp; (iii) khảo sát thực địa, quan sát tham dự tại các điểm di sản và lễ hội tại khu vực phía đông tỉnh Đắk Lắk (theo danh mục Di tích được xếp hạng tỉnh Phú Yên tính đến ngày 30/6/2025); (iv) kiểm kê, phân loại tài nguyên; và (v) phân tích không gian để xây dựng mô hình đề xuất.

Các tài nguyên được lựa chọn sơ bộ theo năm tiêu chí: giá trị lịch sử - văn hóa; giá trị cảnh quan - sinh thái; tính đại diện cho bản sắc địa phương; khả năng tiếp cận, kết nối; và tiềm năng hình thành sản phẩm trải nghiệm, sinh kế cộng đồng. Do chưa có bộ dữ liệu định lượng đồng nhất cho toàn tỉnh, nghiên cứu sử dụng đánh giá định tính và xem kết quả như một khung định hướng cần được kiểm chứng ở các bước quy hoạch chi tiết.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

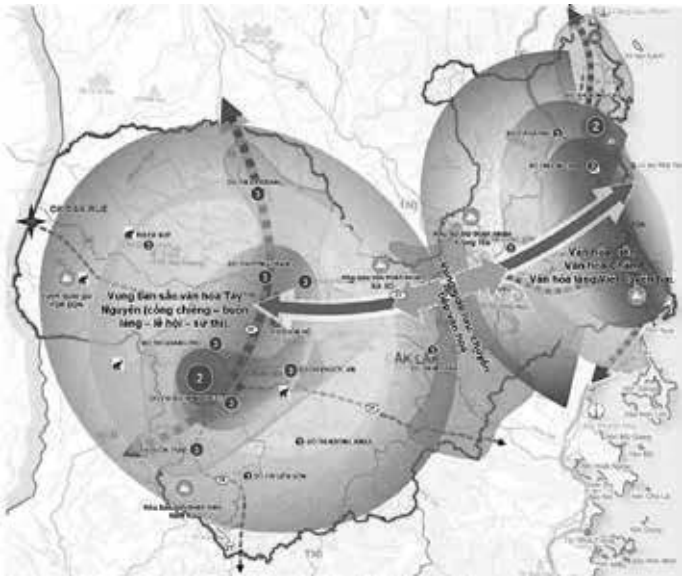
4.1. Các lớp văn hóa và cấu trúc không gian di sản

Không gian tỉnh Đắk Lắk mới được hình thành từ nhiều lớp lịch sử - văn hóa kế tiếp và đan xen. Ở phía Đông, các dấu tích khảo cổ, di sản Chăm Pa, quá trình khai khẩn của cư dân Việt, văn hóa làng biển và các

thiết chế thời cận đại tạo nên bản sắc duyên hải. Ở phía Tây, văn hóa bản địa Tây Nguyên, không gian buôn làng, giao lưu khu vực và quá trình hình thành các đô thị - vùng sản xuất cao nguyên tạo nên một hệ giá trị khác biệt nhưng có khả năng bổ trợ [9, 10]. Bảng 1 khái quát tiến trình lịch sử, các lớp văn hóa chính và nhận diện vai trò của từng lớp văn hóa đối với việc xác lập chủ đề, điểm đến và nội dung diễn giải của Hành lang di sản Đông - Tây. Kết quả tổng hợp cho thấy Hành lang Đông - Tây được hình thành từ sự kế tiếp và giao thoa của sáu lớp lịch sử, giữa các không gian văn hóa duyên hải - cao nguyên, thay vì sự ghép nối đơn thuần các điểm di sản.

Bảng 1. Các lớp văn hóa và ý nghĩa đối với Hành lang di sản Đông - Tây trong không gian tỉnh Đắk Lắk mới *(Nguồn: Tác giả tổng hợp)*

Giai đoạn	Lớp văn hóa khu vực duyên hải	Lớp văn hóa khu vực Tây Nguyên	Ý nghĩa đối với Hành lang di sản Đông - Tây
Thời tiền sử và sơ sử	Dấu tích cư trú sớm tại lưu vực sông Ba và duyên hải; đàn đá, kèn đá Tuy An cùng các di vật đá - gốm; gắn với không gian văn hóa Sa Huỳnh.	Các di chỉ Đá Mới – kim khí sớm tại cao nguyên Đắk Lắk, phân bố dọc sông Srêpốk và các nguồn nước, phản ánh quá trình định cư lâu dài.	Hình thành nền tảng cảnh quan - cư trú ban đầu; các lưu vực sông là trục kết nối tự nhiên giữa cao nguyên và duyên hải.
Từ đầu Công nguyên đến thế kỷ XV	Di sản Chăm Pa với tháp Nhạn, thành Hồ, di vật khảo cổ, gốm và tín ngưỡng; phát triển nông nghiệp, thủ công và thương mại.	Văn hóa bản địa Ê-đê, Ba Na, M'nông và các nhóm Tây Nguyên: buôn làng, nhà dài, sử thi, lễ hội và không gian cồng chiêng.	Hình thành hai cực di sản tiêu biểu: Chăm Pa ở duyên hải - văn hóa buôn làng, cồng chiêng ở cao nguyên, tạo nền tảng cho hành lang Đông - Tây.
Từ thế kỷ XVI đến thế kỷ XIX	Hình thành Phú Yên (1611), mở rộng cư trú người Việt; giao thoa Việt - Chăm thể hiện qua làng biển, tín ngưỡng, lễ hội, nghề biển và kiến trúc dân gian.	Buôn làng gắn với rừng, nương rẫy và sông suối; Buôn Đôn trở thành đầu mối giao lưu giữa các cộng đồng Tây Nguyên và khu vực.	Hình thành mạng lưới giao lưu Đông - Tây qua sông Ba và các tuyến đường truyền thống, tiền đề cho hành lang di sản.
Cuối thế kỷ XIX đến năm 1954	Hình thành lớp di sản thuộc địa và hiện đại: đường sắt, nhà ga, công sở, nhà thờ, hạ tầng đô thị và giao thông.	Đắk Lắk trở thành đơn vị hành chính (1904), Buôn Ma Thuột phát triển thành trung tâm; mở rộng đồn điền và giao thông.	Bổ sung lớp di sản kỹ thuật - đô thị - công nghiệp; tăng cường liên kết không gian giữa cao nguyên và duyên hải.
Từ năm 1954 đến năm 1975	Không gian chiến tranh với Vũng Rô, đường Hồ Chí Minh trên biển và hệ thống đô thị - giao thông phục vụ chiến sự.	Tây Nguyên là địa bàn chiến lược; nổi bật với Buôn Ma Thuột và các không gian buôn làng trong bối cảnh chiến tranh.	Hình thành lớp ký ức lịch sử thế kỷ XX, có thể kết nối thành tuyến di sản lịch sử - cách mạng Đông - Tây.
Từ năm 1975 đến nay	Đô thị hóa, kinh tế biển và du lịch phát triển; Bài chòi, lễ hội, ẩm thực và làng nghề tiếp tục tạo bản sắc địa phương.	Không gian văn hóa Cồng chiêng, sử thi, kiến trúc buôn làng và lễ hội tiếp tục được bảo tồn, đồng thời chịu tác động của hiện đại hóa.	Hình thành hệ thống di sản đa lớp; cần quản trị tích hợp để cân bằng bảo tồn - phát triển - sinh kế cộng đồng và kiểm soát tác động môi trường.



Hình 4. Định hướng phân vùng không gian văn hóa tỉnh Đắk Lắk *(Nguồn [8])*

4.2. Phân vùng không gian văn hóa

Cấu trúc văn hóa của tỉnh có thể tổ chức thành ba vùng liên kết: (1) không gian văn hóa Tây Nguyên, lấy Buôn Ma Thuột và các đô thị phía Tây làm hạt nhân, ưu tiên bảo tồn cấu trúc buôn làng, cảnh quan cao nguyên, văn hóa Cồng chiêng, sử thi và các sinh kế bản địa; (2) không gian văn hóa duyên hải, lấy Tuy Hòa và chuỗi đô thị ven biển làm hạt nhân, tập trung các giá trị cảnh quan biển, thích ứng biến đổi khí hậu, di sản người Việt, Chăm Pa, văn hoá làng biển, lúa nước và làng nghề; (3) vùng chuyển tiếp Đông - Tây dọc Quốc lộ 29 và CT.23 dự kiến, đóng vai trò kết nối sinh thái và trải nghiệm giữa hai vùng (Hình 4). Cấu trúc phân vùng không gian văn hoá này thống nhất và tương đồng với phân vùng không gian trong Điều chỉnh Quy hoạch tỉnh Đắk Lắk hiện nay [8]. Từ đó, nhận diện và xây dựng hành lang di sản Đông - Tây.

4.3. Đề xuất Hành lang di sản Đông - Tây

Trên cơ sở cấu trúc không gian di sản và phân vùng không gian văn hóa như trên, đề xuất kiến tạo hành lang di sản Đông - Tây với các nội dung cụ thể như sau:

4.3.1. Chủ đề và ranh giới

Hành lang được đề xuất với chủ đề "Biển - Rừng - Tây Nguyên". Trục chính dựa trên Quốc lộ 29, kết nối với CT.23 dự kiến và các tuyến Bắc - Nam

tại những đầu mối đô thị. Về phía Đông, hành lang liên kết Tuy Hòa với chuỗi đô thị và điểm di sản ven biển từ Vũng Rô đến đầm Cù Mông; về phía Tây, hành lang kết nối Ea Kar, Buôn Ma Thuột, Buôn Đôn và cửa khẩu Đắk Ruê. Các điểm trung gian gồm Phú Hòa, Tây Hòa, Hai Riêng, hồ Sông Ba Hạ, hồ Krông Hnăng và Khu bảo tồn thiên nhiên Krông Trai và Ea Sô.

Bảng 2. Danh mục sơ bộ ở khu vực duyên hải

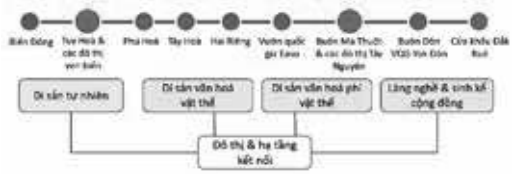
Nhóm	Tài nguyên tiêu biểu	Địa điểm	Tình trạng pháp lý	Giá trị đối với hành lang
Di sản tự nhiên	Bãi Môn - Hải Đăng Mũi Điện, Núi Đá Bia	Xã Hòa Xuân	Danh thắng quốc gia	Điểm đón bình minh đầu tiên trên đất liền; cảnh quan núi – biển, giá trị lịch sử.
	Quần thể Hòn Yến	Xã Ô Loan	Danh thắng quốc gia	Điểm cảnh quan địa chất – sinh thái biển.
	Đầm Ô Loan	Xã Ô Loan	Danh thắng quốc gia	Không gian sinh thái đầm và sinh kế thủy sản.
	Gành Đá Đĩa	Xã Tuy An Đông	Danh thắng quốc gia đặc biệt	Điểm lõi địa chất – cảnh quan của hành lang.
	Vịnh Xuân Đài	Phường Xuân Đài	Danh thắng quốc gia	Cảnh quan vịnh gắn với sinh thái và sinh kế biển.
Di sản văn hóa vật thể	Di tích Vũng Rô	Xã Hòa Xuân	DTQG đặc biệt	Điểm lõi tuyến di sản lịch sử - cách mạng.
	Tháp Nhạn	Phường Tuy Hòa	DTQG đặc biệt	Điểm lõi văn hóa Chăm Pa.
	Mộ và Đền thờ Lương Văn Chánh	Xã Phú Hòa 2	Di tích quốc gia	Dấu ấn lịch sử hình thành vùng đất Phú Yên.
	Thành Hồ	Xã Phú Hòa 1	Di tích khảo cổ	Liên kết lớp di sản Chăm Pa - Việt.
	Đập Đồng Cam	Xã Phú Hòa 1	Di tích quốc gia	Di sản thủy lợi gắn với lưu vực sông Ba.
	Nhà thờ Mằng Lăng	Xã Tuy An Đông	Công trình cần bảo tồn	Điểm di sản kiến trúc – tôn giáo.
	Thành An Thổ	Xã Tuy An Bắc	Di tích khảo cổ quốc gia	Điểm di sản lịch sử - hành chính.
	Chùa Đá Trắng (Từ Quang)	Xã Tuy An Bắc	Di tích quốc gia	Điểm văn hóa - tôn giáo gắn với cảnh quan.
Di sản văn hóa phi vật thể	Nghệ thuật Bài Chòi	Các xã, phường đồng bằng	Di sản UNESCO (2017)	Kết nối cộng đồng và bản sắc văn hóa duyên hải.
	Lễ hội Cầu ngư	Các vạn chài ven biển	DSVHPVT quốc gia (2016)	Liên kết tín ngưỡng với không gian làng biển.
	Đàn đá, kèn đá Tuy An	Xã Tuy An Đông	Bảo vật quốc gia	Điểm nhấn văn hóa tiền sử và âm nhạc.
Làng nghề - sinh kế	Làng nghề bánh tráng Hòa Đa	Xã Tuy An Nam	Làng nghề truyền thống	Điểm trải nghiệm ẩm thực - cộng đồng.
	Nghề dệt chiếu cói Phú Tân	Xã Ô Loan	Làng nghề truyền thống cấp tỉnh	Điểm trải nghiệm nghề thủ công.
	Nghề làm bún bắp Tuy An	Xã Tuy An Bắc	Nghề truyền thống cần bảo tồn	Giá trị ẩm thực bản địa.
	Nghề làm nước mắm Gành Đỏ	Xã Xuân Thọ	DSVHPVT quốc gia (2023)	Sinh kế và văn hóa làng biển.
	Nghề làm muối Tuyết Diêm	Xã Xuân Cảnh	Làng nghề truyền thống cấp tỉnh	Cảnh quan văn hóa - sinh kế ven biển.
	Nghề nuôi tôm hùm vũng, vịnh	Phường Sông Cầu	Nghề truyền thống; chỉ dẫn địa lý	Không gian sinh kế và trải nghiệm vùng vịnh.

4.3.2. Nhận diện tài nguyên di sản

Tài nguyên tham gia hành lang được phân thành bốn nhóm: di sản tự nhiên; di sản văn hóa vật thể; di sản văn hóa phi vật thể; và làng nghề - sinh kế truyền thống [11].

4.3.3. Cấu trúc không gian và sản phẩm trải nghiệm

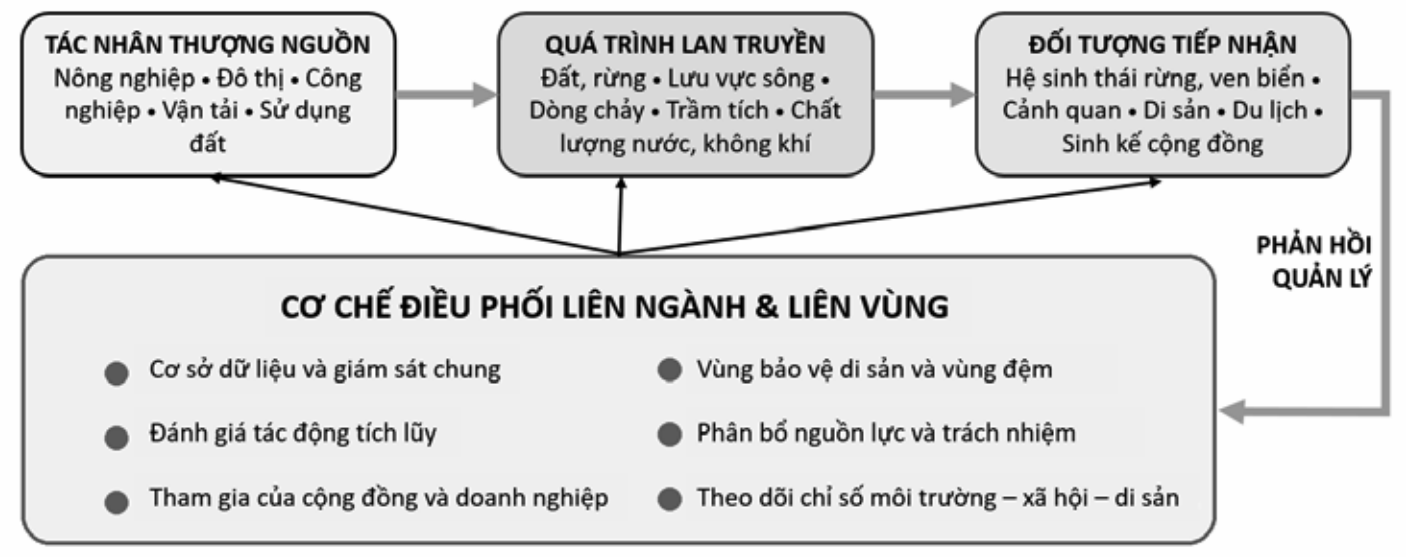
Mô hình hành lang gồm một trục kết nối chính và các cụm điểm đến tổ chức theo chủ đề cảnh quan biển, di sản Chăm - Việt, văn hóa làng nghề, sinh thái rừng và văn hóa Tây Nguyên (Hình 5). Hệ thống diễn giải cần thống nhất nhận diện, bản đồ, biển chỉ dẫn, nội dung số và câu chuyện tuyến, nhưng vẫn tôn trọng tính đặc thù của từng cộng đồng. Hành lang không chỉ là tuyến du lịch đơn thuần, mà là cấu trúc phối hợp bảo tồn, hạ tầng, sinh kế và môi trường. Các điểm dừng được lựa chọn theo sức tải, mức độ sẵn sàng, khả năng cung cấp dịch vụ và sự đồng thuận của cộng đồng; tránh đầu tư dàn trải hoặc thương mại hóa làm suy giảm tính xác thực của di sản.



Hình 5. Mô hình đề xuất Hành lang di sản Đông - Tây tỉnh Đắk Lắk

4.4. Khung quản trị tích hợp gắn với tương tác Đất liền - Biển

Khung quản trị LSI được tổ chức theo chuỗi "tác nhân - quá trình lan truyền - đối tượng tiếp nhận - phản hồi quản lý" (Hình 6), qua đó nhận diện tác động của phát triển thượng nguồn đến hệ sinh thái, di sản, du lịch và sinh kế hạ lưu. Cơ chế quản trị cần có một đầu mối điều phối cấp tỉnh, nhưng trách nhiệm chuyên môn vẫn thuộc các cơ quan quản lý ngành, chính quyền địa phương cấp xã, cộng đồng và doanh nghiệp. Trong đó, chính quyền cấp tỉnh xây dựng chương trình hành động, lập kế hoạch, triển khai, giám sát và điều phối quản lý; cộng đồng và chính quyền địa phương cấp xã trực tiếp triển khai thực hiện các hoạt động, quản lý trực tiếp và đánh giá phản hồi. Các công cụ ưu tiên gồm: xây dựng cơ sở dữ liệu dùng chung; vùng phát triển, vùng bảo vệ di sản và vùng đệm; đánh giá tác động tích lũy đối với các dự án lớn; bộ chỉ số theo dõi môi trường - xã hội - di sản; và quy trình tham vấn cộng đồng, doanh nghiệp [6]. Đối với các xung đột như công nghiệp - cảng biển với du lịch ven biển, thủy điện với dòng chảy sinh thái, hoặc nuôi trồng thủy sản với chất lượng nước, quyết định cần dựa trên dữ liệu lưu vực và sức tải môi trường thay vì chỉ xem xét từng dự án riêng lẻ.



Hình 6. Khung quản trị tích hợp LSI cho Hành lang di sản Đông - Tây

5. KẾT LUẬN

Việc sắp xếp đơn vị hành chính đã mở ra không gian phát triển mới cho tỉnh Đắk Lắk, tạo điều kiện kết nối các giá trị tự nhiên, văn hóa và lịch sử từ Tây Nguyên đến duyên hải trong một cấu trúc liên vùng. Trên cơ sở nhận diện các lớp văn hóa và tài nguyên di sản, nghiên cứu xác định ba vùng có tính bổ trợ gồm: vùng văn hóa Tây Nguyên, vùng chuyển tiếp Đông - Tây và vùng văn hóa duyên hải. Từ đó, mô hình Hành lang di sản Đông - Tây với chủ đề "Biển - Rừng - Tây Nguyên" được đề xuất, kết nối các điểm, cụm di sản, cảnh quan tự nhiên, đô thị, làng nghề và sinh kế cộng đồng thông qua Quốc lộ 29 cùng các trục giao thông liên quan. Hành lang được tiếp cận không chỉ như một tuyến du lịch mà còn là cấu trúc không gian liên kết bảo tồn di sản với phát triển kinh tế - xã hội và tổ chức các hoạt động trải nghiệm văn hóa - sinh thái.

Đóng góp chính của nghiên cứu là kết hợp lý thuyết Hành lang di sản với cách tiếp cận tương tác Đất liền - Biển. Hành lang di sản cung cấp cấu trúc tổ chức và liên kết các nguồn lực văn hóa - tự nhiên, trong khi tương tác Đất liền - Biển hỗ trợ nhận diện và quản trị các tác động từ thượng nguồn đến hạ lưu và ven biển. Cách tiếp cận này mở rộng phạm vi bảo tồn từ từng điểm di sản sang hệ thống di sản - cảnh quan - sinh kế - hạ tầng, tạo cơ sở cho quản trị liên ngành và phát triển bền vững.

Nghiên cứu hiện mới dừng ở định hướng không gian và khung quản trị, với hạn chế về dữ liệu, lượng hóa giá trị di sản, sức tải và tác động tích lũy, đặc biệt tại khu vực Tây Nguyên và vùng chuyển tiếp. Để triển khai thực tế, các nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung khảo sát, hoàn thiện cơ sở dữ liệu, xác định các điểm và cụm ưu tiên, lượng hóa sức tải và xây dựng cơ chế phối hợp liên ngành, có sự tham gia của cộng đồng. Đây là cơ sở để từng bước tích hợp Hành lang di sản Đông - Tây vào quy hoạch và các chương trình đầu tư, hài hòa giữa bảo tồn di sản, phát triển sinh kế và bảo vệ môi trường, hướng đến mục tiêu phát triển xanh và bền vững tỉnh Đắk Lắk.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc Hội. Nghị quyết số 202/2025/QH15 ngày 12/6/2025 của Quốc hội về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh.

[2] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 1660/NQ-UBTVQH 15 về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Đắk Lắk năm 2025.

[3] Innocenti, A. and F. Musco. Land-Sea Interactions: A Spatial Planning Perspective. Journal of Sustainability, vol. 15, no. 12, p. 9446, 2023.

[4] Chen, Y., A. Dang and X.J.J.o.U.M. Peng. Building a cultural heritage corridor based on geodesign theory and methodology. Journal of Urban Management, vol. 3, no. 1-2, pp. 97-112, 2014.

[5] Meng, L., B. Zhang and L.J.L. Cao, Establishing Linear Cultural Heritage Corridors by Integrating Cultural and Ecological Values: A Case Study of the Jinzhong Section of the Great Tea Road. Land, vol. 15, no. 2, p. 293, 2026.

[6] ICOMOS. The ICOMOS Charter on Cultural Routes. International Journal of Cultural Property, 15, pp. 385-392, 2008.

[7] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1454/QĐ-TTg ngày 01/9/2021 phê duyệt Quy hoạch mạng lưới đường bộ thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050.

[8] UBND tỉnh Đắk Lắk. Báo cáo - Định hướng phát triển không gian, đô thị và kết cấu hạ tầng kỹ thuật Điều chỉnh Quy hoạch tỉnh Đắk Lắk thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2026.

[9] UNESCO. The Art of Bài Chòi in Central Viet Nam. Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity, 2016. Internet: https://ich.unesco.org/en/RL/the-art-of-bai-choi-in-central-viet-nam-01222 (accessed: 6/2026)

[10] UNESCO. Space of Gong Culture. Representative List of the Intangible Cultural Heritage of Humanity, 2008. Internet: https://ich.unesco.org/en/RL/space-of-gong-culture-00120 (accessed: 6/2026).

[11] UBND tỉnh Đắk Lắk. Quyết định số 044/2025/QĐ-UBND ban hành Quy định quản lý, bảo vệ và phát huy giá trị di tích; phụ lục danh mục di tích trên địa bàn tỉnh, ngày 18/12/2025.

■ Ngày nộp bài: 28/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 08/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 26/10/2026

Tái cấu trúc mạng lưới tuyến xe buýt TP Hồ Chí Minh sau hợp nhất gắn với phát triển hệ thống bến bãi

Restructuring the post-merger bus route network of Ho Chi Minh City in conjunction with bus facility development

> THS.NCS PHẠM VƯƠNG BẢO
Trung tâm Quản lý giao thông công cộng, Sở Xây dựng TP Hồ Chí Minh
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
Email: baomcpt@gmail.com

TÓM TẮT

Sau hợp nhất ngày 01/7/2025, Thành phố Hồ Chí Minh (TP.HCM) có khoảng 14 triệu dân; mạng lưới xe buýt có 180 tuyến, khoảng 2.432 xe nhưng tỷ lệ đảm nhận nhu cầu đi lại năm 2025 chỉ khoảng 1,6%. Mạng lưới được ghép cơ học từ ba hệ thống, trùng lặp tuyến, thiếu kết nối liên khu vực và thiếu hụt bến bãi. Bài báo đề xuất khung nghiên cứu tổ chức lại mạng lưới theo hướng phân cấp chức năng, lấy đường sắt đô thị làm trục xương sống và coi bến bãi là ràng buộc đầu vào của thiết kế tuyến; phương pháp kết hợp khảo sát, dữ liệu vé điện tử và GPS, mô hình PTV-VISUM và bộ chỉ tiêu đánh giá. Tính toán theo định mức và cơ cấu đoàn xe thực tế cho thấy nhu cầu bến bãi khoảng 23,09 ha, trong khi 19,12 ha hiện có chỉ đáp ứng khoảng 83% nhu cầu và 24% quỹ đất quy hoạch. Kết quả gồm mô hình mạng lưới bốn cấp, phân loại và nguyên tắc bố trí bến bãi, lộ trình ba giai đoạn gắn với đầu tư trạm sạc và các công cụ thực hiện theo Luật Phát triển đô thị năm 2026.

Từ khóa: Xe buýt; tái cấu trúc mạng lưới tuyến; bến bãi xe buýt; depot; TOD; TP Hồ Chí Minh.

ABSTRACT

After the merger on 1 July 2025, Ho Chi Minh City (HCMC) has about 14 million inhabitants; its bus network has 180 routes and about 2,432 buses, yet buses carried only about 1.6% of trips in 2025. The network was joined mechanically from three systems, with route overlap, missing cross-area links and a shortage of bus facilities. This paper proposes a framework for restructuring the network into a functional hierarchy with urban rail as the backbone, treating bus facilities as an input constraint of route design; the method combines surveys, smart-card and GPS data, a PTV-VISUM model and a set of indicators. Norm-based estimates for the actual fleet mix give a demand of about 23.09 ha, of which the existing 19.12 ha meet only about 83%, or 24% of the planned land. The outputs are a four-tier network model, a facility typology with siting principles, a three-phase roadmap linked to charging investment and implementation instruments under the 2026 Law on Urban Development.

Keywords: Bus; route network restructuring; bus terminal; depot; TOD; Ho Chi Minh City.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Từ ngày 01/7/2025, TP.HCM hợp nhất với tỉnh Bình Dương và tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu, trở thành đô thị hơn 14 triệu dân với cấu trúc vùng đa cực gồm đô thị trung tâm, cực công nghiệp - đô thị phía Bắc và cực cảng biển - du lịch phía Đông Nam, trong khi vận tải hành khách công cộng (VTHKCC) liên khu vực gần như chưa phát triển [1]. Mạng lưới xe buýt sau hợp nhất có 180 tuyến, khoảng 2.432 xe, trong đó 1.185 xe điện, nhưng tỷ lệ đảm nhận năm 2025 chỉ khoảng 1,6%, so với chỉ tiêu 7,23% [2]. Các tuyến mới được đưa về một đầu mối quản lý, vẫn theo ranh giới hành chính cũ và chưa gắn với lộ trình đường sắt đô thị.

Bến bãi là điểm nghẽn kéo dài: Quy hoạch năm 2013 xác định 81,17 ha [3], nhưng năm 2026 diện tích ổn định chỉ khoảng 19,12 ha [2]; nhiều điểm đầu - cuối vẫn nằm trên lòng, lề đường [4]. Mục tiêu 100% xe dùng điện, năng lượng xanh vào năm 2030 [1] đặt thêm yêu cầu quỹ đất cho depot và trạm sạc. Cùng lúc, Luật Phát triển đô thị số 18/2026/QH16 trao cho Thành phố thẩm quyền quy định chính sách về VTHKCC, bến bãi, phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) và giá vé liên thông [5].

Bài báo nhằm lượng hóa các vấn đề cấu trúc của mạng lưới và bến bãi, đề xuất khung phương pháp tổ chức lại mạng lưới gắn với

bến bãi, xây dựng định hướng mạng lưới phân cấp, bố trí bến bãi theo giai đoạn và xác định công cụ thực hiện. Nội dung được phát triển từ đề cương Đề án phát triển VTHKCC bằng xe buýt TP.HCM năm 2026 [1].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Thiết kế mạng lưới tuyến là bài toán tối ưu nhiều mục tiêu, cân bằng lợi ích hành khách với chi phí vận hành và trợ giá; bài toán thường được phân rã thành thiết kế tuyến, xác định tần suất, lập biểu đồ chạy xe, phân bổ phương tiện và lái xe [6, 7]. Vị trí điểm đầu - cuối giới hạn điểm khởi phát của tuyến, vị trí depot quyết định quãng đường chạy rỗng, năng lực điểm trung chuyển quyết định mức độ chấp nhận chuyển tuyến [6]. Cải cách xe buýt Seoul năm 2004 phân tuyến thành bốn cấp chức năng, kết hợp làn ưu tiên, vé tích hợp và hợp đồng vận hành bán công, cho thấy tái cấu trúc tuyến phải đi cùng hạ tầng và cơ chế [8].

Ở trong nước, nghiên cứu năm 2014 xác lập định mức diện tích bến bãi 72,3; 106,0 và 140,0 m^2/xe cho xe 40, 55 và 80 chỗ, ghi nhận chạy rỗng khoảng 11% tổng cự ly và nhiều đoạn tuyến trùng lặp 4,7 - 15,8 km [9]. Báo cáo tổ chức lại mạng lưới xe buýt thuộc Dự án BRT số 2 ghi nhận khoảng 38 vị trí điểm đầu - cuối, đỗ xe trên lòng, lề đường [4]. Nghiên cứu chuyển đổi xe buýt điện theo định hướng TOD xây dựng lộ trình đầu tư trạm sạc đến năm 2030 và chỉ ra quỹ đất bến bãi, trạm sạc mới đáp ứng khoảng 21,1% quy hoạch [10]. Các nghiên cứu này còn giới hạn ở TP.HCM cũ, chưa thiết kế lại mạng lưới theo lộ trình đường sắt đô thị và xử lý bến bãi tách rời, sau bài toán tuyến - khoảng trống mà bài báo hướng tới.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Khung nghiên cứu và dữ liệu

Khung nghiên cứu (Hình 1) coi phương án tuyến và phương án bến bãi là hai hợp phần phụ thuộc, được thiết kế đồng thời: Một phương án tuyến chỉ được chấp nhận khi có điểm đầu - cuối, depot và điểm sạc khả thi về quỹ đất; phương án không đạt bộ chỉ tiêu được quay lại bước thiết kế.



Hình 1. Khung nghiên cứu tái cấu trúc mạng lưới tuyến gắn với phát triển bến bãi

Dữ liệu gồm dữ liệu kinh tế - xã hội, sử dụng đất, mạng lưới giao thông và dữ liệu vận hành xe buýt số hóa trên nền GIS; khảo sát bổ sung khoảng 4.500 phiếu phỏng vấn, đếm hành khách trên 30 tuyến, tại 20 điểm trung chuyển và lưu lượng tại 10 mặt cắt; dữ liệu GPS, vé điện tử được dùng để hiệu chỉnh ma trận điểm đi - điểm đến. Mô hình PTV-VISUM của Thành phố được mở rộng ra phạm vi thành phố mới theo cấu trúc bốn bước, với các năm dự báo 2030, 2035 và 2050 [1].

3.2. Bộ chỉ tiêu đánh giá

Tỷ lệ dân số được phục vụ trong bán kính 500 m từ điểm dừng hoặc ga:

$$C_{500} = \frac{P_{500}}{P} \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó: P_{500} là dân số trong vùng đệm 500 m theo đường đi bộ; P là tổng dân số; mục tiêu $C_{500} \geq 60\%$ năm 2030 [1].

Hệ số trùng lặp và hệ số chạy rỗng của tuyến r:

$$O_r = \frac{L_r^{\text{trùng}}}{L_r} \quad (2)$$

$$K_r = \frac{L_r^{\text{rỗng}}}{L_r^{\text{rỗng}} + L_r^{\text{khách}}} \quad (3)$$

Trong đó: L_r là chiều dài tuyến; $L_r^{\text{trùng}}$ là chiều dài đoạn trùng với tuyến cùng cấp hoặc đường sắt; $L_r^{\text{rỗng}}$, $L_r^{\text{khách}}$ là quãng đường chạy không khách và có khách. Giá trị K_r toàn mạng khoảng 0,11 [9] được dùng làm đường cơ sở.

Nhu cầu diện tích bến bãi của đoàn phương tiện:

$$S_d = (1 + k) \sum_i N_i s_i \quad (4)$$

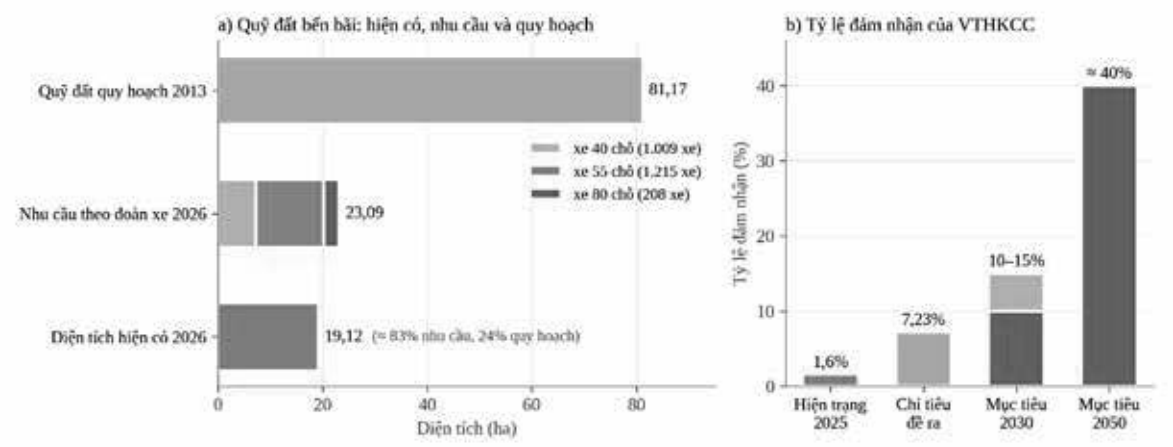
Trong đó: N_i là số xe loại i; s_i là định mức diện tích cho một xe loại i [9]; k là hệ số bổ sung cho trạm sạc, trạm biến áp và khu điều hành.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Hiện trạng mạng lưới và mức thiếu hụt bến bãi

Mạng lưới có bốn vấn đề cấu trúc: (i) Ghép cơ học từ ba hệ thống hướng tâm, gặp nhau ở vùng giáp ranh (Dĩ An, Thuận An, Thủ Đức, Phú Mỹ) mà không có nút trung chuyển chung; (ii) thiếu tuyến kết nối giữa các cực, các tuyến liên khu vực mới có cự ly rất dài [1]; (iii) trùng lặp giữa các tuyến buýt và với đường sắt đô thị [9]; (iv) dịch vụ tập trung ở trung tâm cũ, vùng ngoại thành và khu công nghiệp có tần suất thấp. Tỷ lệ đảm nhận 1,6% chỉ bằng khoảng một phần năm chỉ tiêu và rất xa mục tiêu năm 2030 (Hình 2b).

Áp dụng công thức (4) với $k = 0$ cho đoàn xe thực tế 2.432 xe, gồm 1.009 xe 40 chỗ, 1.215 xe 55 chỗ và 208 xe 80 chỗ, nhu cầu diện tích bến bãi là 23,09 ha (Hình 2a). Diện tích hiện có 19,12 ha chỉ đáp ứng khoảng 83% nhu cầu, thiếu khoảng 3,97 ha, và bằng 24% quỹ đất quy hoạch năm 2013. Do định mức chưa tính yêu cầu của xe điện ($k > 0$), thiếu hụt thực tế còn lớn hơn.



Hình 2. Quỹ đất bến bãi xe buýt (a) và tỷ lệ đảm nhận của VTHKCC (b): Hiện trạng so với nhu cầu, chỉ tiêu

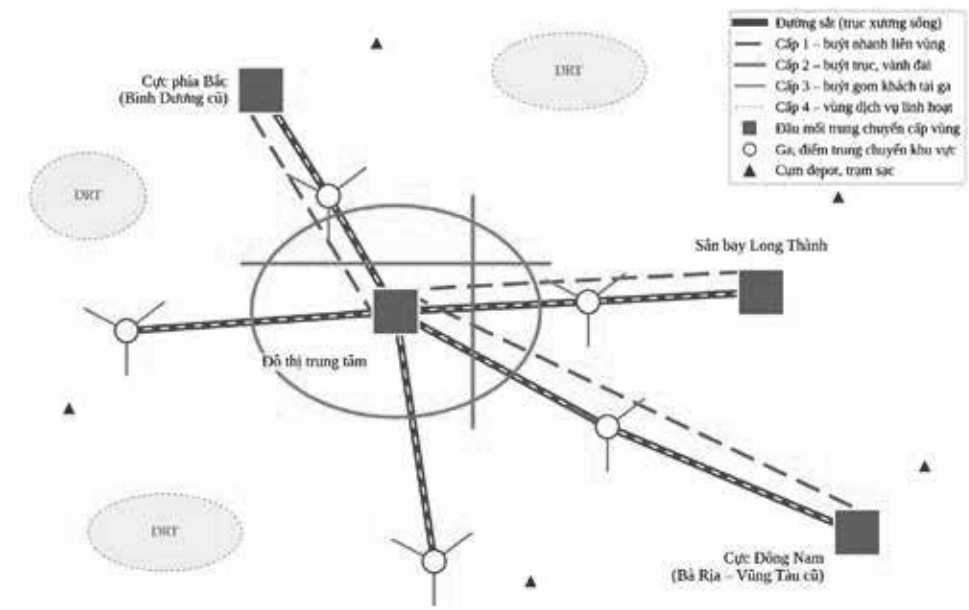
4.2. Mô hình mạng lưới xe buýt bốn cấp

Tái cấu trúc tuân theo các nguyên tắc: Đường sắt đô thị là trục xương sống, xe buýt không chạy song song dài với đường sắt; thiết kế theo hành lang nhu cầu thay cho ranh giới hành chính cũ; ưu tiên tần suất và độ thẳng tuyến, chấp nhận chuyển tuyến khi có điểm trung chuyển đạt chuẩn và vé liên thông; mỗi tuyến gắn với một điểm đầu - cuối ổn định và một depot xác định; điều chỉnh theo từng đợt, bám mốc vận hành đường sắt. Trên cơ sở đó, mạng xe buýt được tổ chức thành bốn cấp (Bảng 1, Hình 3).

Bảng 1. Mô hình mạng lưới xe buýt bốn cấp đề xuất

Cấp	Chức năng	Đặc điểm	Tần suất cao điểm	Hạ tầng gắn kèm
Cấp 1 - Buýt nhanh liên vùng	Nối các cực đô thị và sân bay Long Thành; bổ trợ hành lang chưa có đường sắt	Cự ly dài, dừng ít, làn ưu tiên	10 - 15 phút	Đầu mối trung chuyển cấp vùng
Cấp 2 - Buýt trục đô thị	Hành lang nhu cầu lớn trong từng cực; tuyến vành đai nối các ga	Tuyến thẳng, qua nhiều ga	5 - 10 phút	Điểm trung chuyển đa phương thức
Cấp 3 - Buýt gom khách	Gom, phân phối khách cho ga và tuyến trục; phục vụ khu dân cư, khu công nghiệp	Cự ly ngắn - trung bình, xe cỡ vừa, nhỏ	10 - 20 phút	Điểm đầu - cuối tại ga
Cấp 4 - Dịch vụ linh hoạt	DRT cho xã ngoại thành, giờ thấp điểm; đưa đón học sinh; tuyến du lịch, ven biển	Tuyến động hoặc bán cố định	Theo nhu cầu	Điểm đỗ nhỏ, dùng chung hạ tầng cấp 3

Nguồn: Tác giả đề xuất.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý mạng lưới xe buýt bốn cấp gắn với đường sắt và hệ thống bến bãi

Tuyến hiện hữu được đánh giá theo tải trọng, hệ số O_r, cự ly, trợ giá trên mỗi hành khách và khả năng bố trí đầu - cuối, rồi xếp vào năm nhóm: Giữ ổn định; điều chỉnh lộ trình; rút ngắn, chia tách tại ga; sáp nhập hoặc thay bằng dịch vụ theo nhu cầu (DRT); mở mới có điều kiện, kèm dự án bến bãi tương ứng.

4.3. Định hướng phát triển hệ thống bến bãi và trạm sạc

Hệ thống bến bãi được phân loại tương ứng với bốn cấp tuyến (Bảng 2).

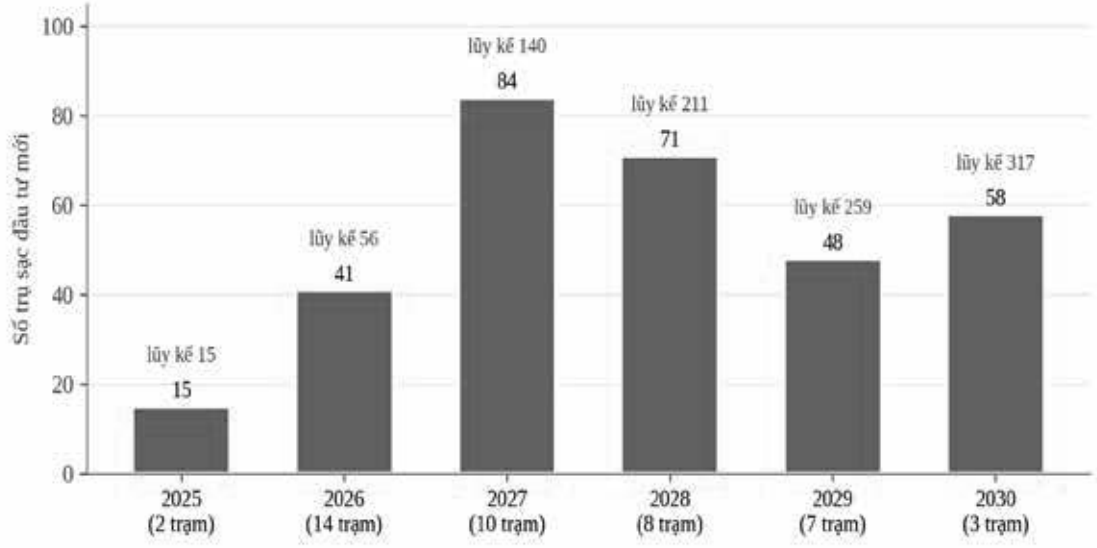
Bảng 2. Phân loại hạ tầng bến bãi phục vụ xe buýt đề xuất

Loại hạ tầng	Chức năng	Vị trí ưu tiên	Cấp tuyến
Đầu mối trung chuyển cấp vùng	Trung chuyển giữa buýt liên vùng, đường sắt, hàng không, xe khách	Ga đường sắt lớn, cảng hàng không, bến xe khách cũ sau di dời	1, 2
Điểm trung chuyển cấp khu vực	Chuyển tuyến giữa buýt và nhà ga; có bãi đỗ xe trung chuyển (P&R)	Ga đường sắt đô thị, nút giao các tuyến trục	2, 3
Điểm đầu - cuối	Quay đầu, điều độ, nghỉ giữa chuyến, sạc bổ sung	Đầu tuyến, ngoài lòng lề đường	1-4
Depot	Đỗ qua đêm, bảo dưỡng, sạc qua đêm	Vành đai ngoài khu trung tâm, gần nguồn điện trung thế	1-3
Điểm dừng, nhà chờ	Đón trả khách, thông tin thời gian thực	Trong phạm vi đi bộ 500 m của khu dân cư	2-4

Nguồn: Tác giả đề xuất.

Việc bố trí tuân theo ba nguyên tắc: Mỗi cực đô thị có tối thiểu một đầu mối trung chuyển cấp vùng và một cụm depot riêng để tránh chạy rỗng liên cực; depot đặt ở vành đai ngoài, gần cụm điểm đầu tuyến, các phương án vị trí được so sánh bằng hệ số K_r so với đường cơ sở 0,11; tận dụng quỹ đất công (bến xe khách cũ, đất tại ga và depot đường sắt, không gian dưới cầu cạn) và tích hợp vào quy hoạch khu vực TOD.

Về hạ tầng sạc, lộ trình hiện có dự kiến chuyển đổi 10 tuyến (157 xe) năm 2027, 31 tuyến (647 xe) năm 2028, 22 tuyến (314 xe) năm 2029 và đầu tư 44 trạm, 317 trụ sạc đến năm 2030 (Hình 4) [10]. Khoảng 49% số trụ tập trung vào 2027 - 2028, trùng với giai đoạn tổ chức lại tuyến mạnh nhất, vì vậy vị trí trạm sạc cần được chốt theo phương án tuyến mới.

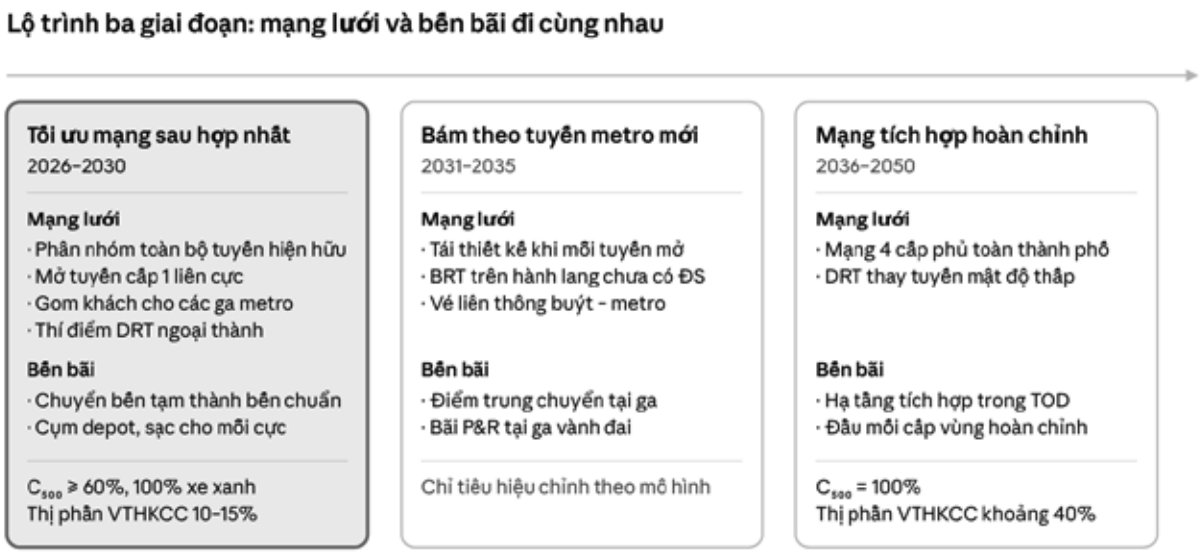


Hình 4. Lộ trình đầu tư trạm, trụ sạc xe buýt điện giai đoạn 2025 - 2030

4.4. Lộ trình và công cụ thực hiện

Lộ trình gồm ba giai đoạn trùng với các mốc dự báo (Hình 5). Ở mỗi giai đoạn, hạng mục tuyến và bến bãi được lập thành cặp để không mở tuyến mới khi chưa có hạ tầng đầu - cuối.

Luật Phát triển đô thị [5] cung cấp các công cụ trực tiếp: Đưa đầu mối trung chuyển, cụm depot vào Quy hoạch tổng thể Thành phố (Điều 10); khai thác không gian ngầm cho depot đa tầng (Điều 11); dùng khoản thu khu vực TOD cho điểm trung chuyển, bãi đỗ xe trung chuyển (Điều 13); xây dựng bến bãi, trạm sạc tạm trên đất công để xóa điểm đầu - cuối trên lòng lề đường, ban hành vé liên thông buýt - metro và đặt hàng dịch vụ theo cấp tuyến (Điều 14); huy động khu vực tư nhân khai thác depot, trạm sạc (Điều 35, 36).



Hình 5. Lộ trình tái cấu trúc mạng lưới tuyến và phát triển bến bãi theo ba giai đoạn

5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất khung tổ chức lại mạng lưới xe buýt TP.HCM sau hợp nhất, trong đó bến bãi là ràng buộc đầu vào của thiết kế tuyến. Kết quả chính gồm: (1) Mô hình mạng lưới bốn cấp lấy đường sắt đô thị làm trục; (2) lượng hóa thiếu hụt bến bãi - với cơ cấu đoàn xe thực tế, diện tích hiện có chỉ đáp ứng khoảng 83% nhu cầu theo định mức (thiếu khoảng 3,97 ha) và 24% quy hoạch; (3) bộ chỉ tiêu C_{500}, O_r, K_r, S_d cho phép đánh giá đồng thời phương án tuyến và phương án bến bãi; (4) lộ trình trạm sạc cần đồng bộ với lộ trình tổ chức lại tuyến và Luật Phát triển đô thị năm 2026 cung cấp đủ công cụ thực hiện.

Hạn chế của nghiên cứu là kết quả mới ở mức khung phương pháp và định hướng; ước tính nhu cầu bến bãi dùng định mức năm 2014, chưa phản ánh đầy đủ yêu cầu của xe buýt điện. Phương án tuyến và quy mô từng bến bãi sẽ được xác định sau khi hoàn thành khảo sát và chạy mô hình.

Lời cảm ơn: Tác giả xin cảm ơn TS Mai Bá Lĩnh và PGS.TS Nguyễn Hồng Thái đã định hướng nghiên cứu và Trung tâm Quản lý Giao thông công cộng Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ số liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Trung tâm Quản lý Giao thông công cộng TP Hồ Chí Minh. Tờ trình số 194/TTr-TTQLGTCC về phê duyệt đề cương, nhiệm vụ và dự toán kinh phí Đề án phát triển VTHKCC bằng xe buýt trên địa bàn TP Hồ Chí Minh, ngày 15/7/2026.

[2] Ủy ban nhân dân TP Hồ Chí Minh. Tờ trình số 560/TTr-UBND về dự thảo Nghị quyết của Hội đồng nhân dân Thành phố về hỗ trợ cho người sử dụng phương tiện VTHKCC bằng xe buýt trên địa bàn TP Hồ Chí Minh, ngày 15/5/2026.

[3] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 568/QĐ-TTg phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch phát triển giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh đến năm 2020 và tầm nhìn sau năm 2020, ngày 08/4/2013.

[4] TCIP, Dohwa Engineering, UTCV. Báo cáo chính: Tư vấn nghiên cứu tổ chức lại mạng lưới xe buýt trên toàn Thành phố và chuẩn bị kế hoạch hành động để nâng cao hiệu quả và chất lượng dịch vụ của hệ thống xe buýt hiện hữu (Dự án BRT số 2 - Gói CS9), TP Hồ Chí Minh, 2022.

[5] Quốc hội. Luật Phát triển đô thị số 18/2026/QH16, ngày 24/8/2026.

[6] A. Ceder. Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice. Elsevier, Oxford, 2007.

[7] V. Guihaire, J.-K. Hao. Transit network design and scheduling: A global review. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 42, no. 10, pp. 1251-1273, 2008, doi: 10.1016/j.tra.2008.03.011.

[8] J. Pucher, H. Park, M. H. Kim, J. Song. Public transport reforms in Seoul: Innovations motivated by funding crisis. Journal of Public Transportation, vol. 8, no. 5, pp. 41-62, 2005.

[9] Phạm Vương Bảo. Đề xuất một số giải pháp phát triển giao thông tĩnh cho VTHKCC bằng xe buýt trên địa bàn TP. Hồ Chí Minh. Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh, 2014.

[10] Lê Văn Cường, Thiều Thị Định, Phạm Vương Bảo, Trương Hoàng Quốc Phong. Nghiên cứu chuyển đổi phương tiện xe buýt sử dụng điện và năng lượng xanh trong phát triển giao thông công cộng theo định hướng TOD tại TP Hồ Chí Minh. Kỷ yếu Hội thảo khoa học quốc gia lần VII: Khoa học và công nghệ giao thông vận tải trong kỷ nguyên số và tự động hóa (CTST 2026). NXB. Giao thông vận tải, tr. 45-52, 2026.

■Ngày nhận bài: 28/9/2026 ■Ngày sửa bài: 02/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/10/2026

Mô hình tổ chức không gian kiến trúc bảo tàng theo xu hướng tăng cường hoạt động trải nghiệm tương tác

Spatial classification and organisational model of museum architecture in the trend of enhanced interactive experience

> THS.KTS TRẦN NGỌC THANH TRANG
Khoa Nội thất, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: thanhtrang167@gmail.com

TÓM TẮT

Sự phát triển của các hình thức trải nghiệm tương tác đang làm thay đổi cách sử dụng và tổ chức không gian bảo tàng. Bên cạnh trưng bày và bảo quản hiện vật, bảo tàng ngày càng cần những không gian cho phép khách tham quan chủ động tìm hiểu, thực hành và trao đổi, trong khi cách phân khu và dây chuyền công năng truyền thống chưa phản ánh đầy đủ mối quan hệ giữa hoạt động trải nghiệm với bảo vệ hiện vật và vận hành công trình. Nghiên cứu sử dụng ba phương pháp: tổng quan tài liệu, nghiên cứu trường hợp đối sánh và phỏng vấn bán cấu trúc chuyên gia. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xây dựng hệ thống phân loại không gian và đề xuất mô hình tổ chức không gian kiến trúc bảo tàng, có tính đến yêu cầu tiếp cận của khách tham quan, bảo vệ hiện vật và vận hành kỹ thuật. Kết quả là cơ sở tham khảo cho thiết kế mới và cải tạo bảo tàng tại Việt Nam.

Từ khóa: Bảo tàng tương tác; tổ chức không gian kiến trúc; phân loại không gian; mô hình tổ chức không gian; trải nghiệm tương tác.

ABSTRACT

The growing emphasis on interactive experiences is changing how museum spaces are used and organised. Alongside displaying and conserving collections, museums increasingly require spaces that encourage visitors to actively explore, engage in hands-on activities and exchange ideas, while conventional zoning and functional organisation do not fully address the relationships between visitor experiences, collection conservation and building operations. The research employs three methods: literature review, comparative case studies and semi-structured expert interviews. By identifying the main functional components and their interrelationships, the study develops a spatial classification framework and proposes an architectural spatial organisation model that takes into account visitor access, collection conservation and technical operations. The findings provide a reference for the design of new museums and the renovation of existing museum buildings in Vietnam.

Keywords: Interactive museums; architectural spatial organisation; spatial classification; spatial organisation model; interactive experiences.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo định nghĩa của Hội đồng Bảo tàng Quốc tế (ICOM) năm 2022, bảo tàng không chỉ lưu giữ, bảo quản và trưng bày di sản mà còn tạo ra những trải nghiệm đa dạng phục vụ giáo dục, thưởng thức, suy ngẫm và chia sẻ tri thức, với sự tham gia của cộng đồng [1]. Tại Việt Nam, với 183 bảo tàng và 327 bảo vật quốc gia [2], việc đổi mới hoạt động trưng bày ngày càng được quan tâm. Các nghiên cứu [3, 4, 5] cho thấy hoạt động bảo tàng đang chuyển từ trưng bày để quan sát sang các hình thức trải nghiệm khuyến khích khách tham quan chủ động khám phá, thực hành và tương tác.

Sự thay đổi này đặt ra những yêu cầu mới đối với tổ chức không gian kiến trúc bảo tàng. Theo các tài liệu hướng dẫn thiết kế [6, 7], cơ cấu không gian thường dựa trên phân chia khu vực công cộng - nội bộ và quan hệ giữa kho bảo quản, phòng trưng bày, bộ phận phục vụ. Cách tổ chức này chưa phản ánh đầy đủ những yêu cầu mới: kho mở, xưởng phục chế mở có tính chất tiếp cận trung gian; hệ thống tương tác cần không gian kỹ thuật và tuyến phục vụ riêng; phòng kết hợp hiện vật gốc với thiết bị tương tác vừa phải đáp ứng trải nghiệm, vừa bảo đảm an toàn cho hiện vật. Mặt khác, Luật Di sản văn hóa năm 2024 [8] đã đề cập đến chuyển đổi số trong lĩnh vực di sản, nhưng tác động của xu hướng này đến tổ chức không gian bảo tàng chưa được làm rõ trong các hướng dẫn thiết kế.

Từ những vấn đề trên, bài báo nghiên cứu sự thay đổi của cơ cấu không gian kiến trúc bảo tàng dưới tác động của xu hướng tăng cường trải nghiệm tương tác, từ đó xây dựng hệ thống phân loại và đề xuất mô hình tổ chức không gian, đáp ứng đồng thời yêu cầu trải nghiệm, bảo vệ hiện vật và vận hành công trình.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để làm cơ sở xây dựng hệ thống phân loại và đề xuất mô hình tổ chức không gian kiến trúc, bài báo sử dụng ba phương pháp nghiên cứu chính:

- Phương pháp tổng quan tài liệu: Phân tích các tài liệu về nguyên lý thiết kế bảo tàng, phân khu chức năng, dây chuyền công năng, hình thức trải nghiệm tương tác và yêu cầu kỹ thuật vận hành. Trên cơ sở đối chiếu cách tổ chức không gian truyền thống với những yêu cầu phát sinh khi tăng cường tương tác, nghiên cứu xác lập ba tiêu chí phân loại: cấp độ tiếp cận của công chúng, sự hiện diện của hiện vật gốc và mức độ phụ thuộc vào hệ thống tương tác.

- Phương pháp nghiên cứu trường hợp đối sánh: Lựa chọn có chủ đích bốn cặp bảo tàng trong nước và quốc tế tương đồng về loại hình trưng bày, gồm: Bảo tàng Mỹ thuật Việt Nam - National Gallery Singapore; Bảo tàng Lịch sử quốc gia Việt Nam - National Museum of American History (Hoa Kỳ); Bảo tàng Thiên nhiên Việt Nam - Natural History Museum (London); Bảo tàng Hà Nội - Museum of the City of New York. Các trường hợp được đối chiếu trên cơ sở tư liệu công bố, mặt bằng và sơ đồ dây chuyền công năng theo ba nội dung: (1) cơ cấu và quan hệ giữa các nhóm không gian; (2) phân cấp tiếp cận và vị trí các không gian có kiểm soát; (3) quan hệ giữa tuyến tham quan với các tuyến phục vụ hiện vật, kỹ thuật và nhân viên. Kết quả đối sánh được sử dụng để nhận diện những thành phần chức năng, quan hệ không gian cần bổ sung hoặc điều chỉnh, làm cơ sở xây dựng hệ thống phân loại và mô hình tổ chức.

- Phương pháp phỏng vấn bán cấu trúc chuyên gia: Phỏng vấn 18 chuyên gia được lựa chọn theo lĩnh vực chuyên môn và kinh nghiệm thực tiễn, gồm kiến trúc - nội thất (6), bảo tàng học - trưng bày (5), bảo quản hiện vật (3) và kỹ thuật - vận hành (4). Bộ câu hỏi mở tập trung vào những thay đổi trong yêu cầu tổ chức không gian, phân cấp tiếp cận, quan hệ giữa các luồng vận hành, tổ chức phòng trưng bày, khu vực dừng - chờ và điều kiện bảo trì hệ thống tương tác. Ý kiến được tổng hợp thành 216 đoạn ghi chú, mã hóa theo tám nhóm chủ đề và phân tích theo mức độ nhấn mạnh, các vấn đề thực tiễn và điều kiện áp dụng. Kết quả được sử dụng để làm rõ những mâu thuẫn trong tổ chức không gian và yêu cầu vận hành, không thay thế việc kiểm chứng hiệu quả của mô hình trên công trình thực tế.

Ba nguồn dữ liệu được đối chiếu nhằm xác định các yêu cầu chung và những khác biệt theo điều kiện công trình. Trong đó, tổng quan tài liệu cung cấp cơ sở xác lập tiêu chí phân loại; nghiên cứu đối sánh làm rõ thành phần chức năng, quan hệ tiếp cận và luồng phục vụ; phỏng vấn chuyên gia bổ sung các vấn đề thực tiễn và điều kiện áp dụng. Trên cơ sở tổng hợp, nghiên cứu đề xuất hệ thống tám nhóm không gian, ba loại phòng trưng bày, sáu dạng cụm hoạt động và mô hình tổ chức không gian với bảy yêu cầu chủ yếu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Những thay đổi trong cơ cấu không gian bảo tàng tương tác

Khi tăng cường trải nghiệm tương tác, nguyên tắc phân khu công cộng - nội bộ và quan hệ kho - phòng trưng bày [6, 7] chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu sử dụng và vận hành. Theo các chuyên gia, bất cập không chỉ do thiếu diện tích mà tập trung tại ranh giới, vị trí chuyển tiếp và nơi nhiều tuyến cùng xuất hiện. Sự thay đổi thể hiện ở bốn khía cạnh: (1) hành trình tham quan cần không gian định hướng, chờ lượt, chuyển tiếp và nghỉ. chuyên gia ghi nhận khách dễ mất phương hướng ở điểm rẽ, chuyển tầng; (2) kho bảo quản, xưởng phục chế được mở cho công chúng tiếp cận có kiểm soát [9], hình thành không gian trung gian giữa công cộng và nội bộ; (3) hệ thống tương tác đòi hỏi không gian kỹ thuật tập trung, điểm kỹ thuật gần phòng sử dụng và tuyến bảo trì; (4) phòng hiện vật gốc, phòng kết hợp và phòng tương tác có yêu cầu khác nhau về tổ chức, bảo quản và vận hành (Bảng 1).

Bảng 1. Những thay đổi trong các thành phần của cơ cấu không gian bảo tàng

Thành phần	Bảo tàng truyền thống	Bảo tàng tương tác
Đón tiếp	Sảnh, bán vé, dịch vụ hoạt động theo giờ mở cửa khu trưng bày	Khu đón tiếp - dịch vụ hoạt động độc lập; bổ sung không gian khởi tạo - điều tiết trải nghiệm sau điểm kiểm soát vé
Trưng bày	Phòng trưng bày hiện vật tương đối đồng nhất	Ba loại phòng theo vai trò hiện vật gốc; cụm hoạt động tương tác có phạm vi chiếm dụng riêng
Giáo dục	Lớp học, hội trường	Không gian giáo dục - sự kiện, xưởng sáng tạo; lối vào riêng, hoạt động cả ngoài giờ
Nghiệp vụ hiện vật	Kho kín, xưởng phục chế – hoàn toàn nội bộ	Một phần chuyển thành không gian bán mở (kho mở, phục chế mở); bổ sung phòng số hóa
Kỹ thuật	Kỹ thuật công trình (điện, điều hòa, phòng cháy)	Bổ sung không gian kỹ thuật cho hệ thống tương tác: khối tập trung và các điểm phân tán trong khu trưng bày
Hành chính	Văn phòng, quản lý	Bổ sung phòng phân tích dữ liệu khách tham quan
Tuyến vận hành	Chủ yếu tách tuyến hiện vật khỏi tuyến tham quan	Bốn tuyến: công chúng, hiện vật, kỹ thuật - dữ liệu, nhân viên - hàng hóa

Nguồn: Tác giả tổng hợp

3.2. Phân loại không gian kiến trúc bảo tàng tương tác

3.2.1. Tiêu chí phân loại

Bên cạnh cách phân khu chức năng truyền thống, nghiên cứu đề xuất hệ thống phân loại dựa trên ba tiêu chí: cấp độ tiếp cận của công chúng, sự hiện diện của hiện vật gốc và mức độ phụ thuộc vào hệ thống tương tác. Tiêu chí tiếp cận được mở rộng thành bốn cấp từ kết quả đối sánh: Keppel Centre (National Gallery Singapore) mở tự do trong khi phòng trưng bày chính bán vé; Wegmans Wonderplace (National Museum of American History) dùng vé theo khung giờ; các khu Hands-on Basecamp, Investigate Centre (Natural History Museum, London) điều tiết sức chứa, tách khỏi khu tham quan tự do.

- Cấp độ tiếp cận của công chúng: Gồm bốn cấp: T1 - công cộng tự do, không yêu cầu vé, có thể hoạt động theo thời gian riêng; T2 - công chúng có kiểm soát, tiếp cận theo vé, đăng ký hoặc điều tiết số lượng khách; T3 - bán mở, công chúng quan sát hoặc tham quan một số hoạt động nghiệp vụ qua vách kính, có hướng dẫn hoặc đặt lịch; T4 - nội bộ, chỉ dành cho nhân viên và người được phép.

- Sự hiện diện của hiện vật gốc: Phân biệt không gian có và không có hiện vật gốc nhằm xác định yêu cầu về bảo quản, an ninh và điều kiện môi trường. Những không gian chỉ sử dụng bản sao, mô hình hoặc nội dung số được xếp vào nhóm không có hiện vật gốc.

- Mức độ phụ thuộc vào hệ thống tương tác: Tiêu chí bổ sung nhằm làm rõ ảnh hưởng của công nghệ tương tác đến tổ chức không gian, gồm ba mức: C0 - không có thiết bị tương tác hoặc chỉ tương tác cơ học đơn giản; C1 - thiết bị tương tác độc lập, chủ yếu cần cấp điện và kết nối mạng; C2 - hệ thống tương tác tích hợp, cần không gian kỹ thuật hỗ trợ và yêu cầu cao hơn về kiểm soát ánh sáng, âm thanh, số người sử dụng.

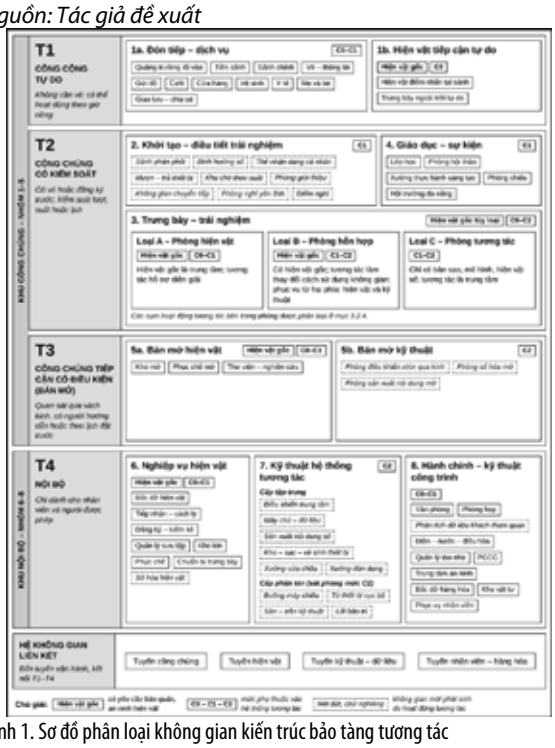
3.2.2. Phân loại các nhóm không gian

Kết hợp cấp độ tiếp cận với sự hiện diện của hiện vật gốc, nghiên cứu xây dựng ma trận tám nhóm không gian (Bảng 2), thuộc hai khu vực: khu phục vụ công chúng (nhóm 1-5) và khu nội bộ (nhóm 6-8). Trong từng nhóm, mức C0-C2 được xem xét để xác định yêu cầu về thiết bị, không gian kỹ thuật và điều kiện vận hành (Hình 1).

Bảng 2. Ma trận phân loại tám nhóm không gian bảo tàng tương tác

Cấp tiếp cận	Không có hiện vật gốc	Có hiện vật gốc
T1 - Công cộng tự do	Nhóm 1a - Đón tiếp, dịch vụ	Nhóm 1b - Hiện vật tiếp cận tự do (sảnh, sân ngoài trời)
T2 - Có kiểm soát	Nhóm 2 - Khởi tạo, điều tiết trải nghiệm; nhóm 3 - phòng tương tác (C); nhóm 4 - Giáo dục, sự kiện	Nhóm 3 - phòng hiện vật (A), phòng hỗn hợp (B)
T3 - Bán mở	Nhóm 5b - Bán mở kỹ thuật (phòng điều khiển, số hóa nhìn qua kính)	Nhóm 5a - Bán mở hiện vật (kho mở, phục chế mở)
T4 - Nội bộ	Nhóm 7 - Kỹ thuật hệ thống tương tác; nhóm 8 - Hành chính, kỹ thuật công trình	Nhóm 6 - Nghiệp vụ hiện vật

Nguồn: Tác giả đề xuất



Hình 1. Sơ đồ phân loại không gian kiến trúc bảo tàng tương tác

Nguồn: Tác giả đề xuất

Trong tám nhóm, có ba nhóm hoàn toàn mới:

- Nhóm 2 - Không gian khởi tạo và điều tiết trải nghiệm (T2): gồm sảnh phân phối, khu định hướng số, quầy mượn - trả thiết bị, khu chờ theo suất, không gian chuyển tiếp và phòng nghỉ yên tĩnh; đảm nhận việc khởi đầu hành trình, điều tiết lưu lượng và điều hòa cảm giác của khách sau các phòng có cường độ kích thích cao, đáp ứng hiện tượng mệt mỏi khi tham quan bảo tàng [10] và nhu cầu của nhóm khách nhạy cảm giác quan [11].

- Nhóm 5 - Không gian bán mở (T3): bố trí tại ranh giới giữa khu trưng bày và khu nội bộ, gồm nhánh hiện vật (5a) và nhánh kỹ thuật (5b); công chúng tiếp cận qua vách kính, có hướng dẫn hoặc theo lịch đặt trước. Cách tổ chức này đáp ứng ý kiến chuyên gia: nhìn thấy kho hay nơi phục chế chưa có nghĩa được đi vào đường nghiệp vụ hay tiếp cận trực tiếp hiện vật.

- Nhóm 7 - Không gian kỹ thuật cho hệ thống tương tác (T4): tổ chức theo hai cấp - cấp tập trung (phòng điều khiển trung tâm, phòng máy chủ, phòng sản xuất nội dung số, kho - sạc thiết bị) và cấp phân tán (buồng máy chiếu, tủ thiết bị, sàn - trần kỹ thuật, lối bảo trì) sát các phòng mức C2, chi phối trực tiếp giải pháp mặt bằng.

3.2.3. Ba loại phòng trưng bày

Nhóm trưng bày (nhóm 3) gồm ba loại phòng theo vai trò của hiện vật gốc: phòng trưng bày hiện vật (loại A), phòng hỗn hợp (loại B) và phòng tương tác (loại C) (Bảng 3). Phòng hỗn hợp được xác định khi hoạt động tương tác ảnh hưởng đáng kể đến cách bố trí và sử dụng không gian, thay vì chỉ bổ sung thiết bị hỗ trợ giới thiệu hiện vật. Các chuyên gia cho rằng phòng hỗn hợp không nhất thiết phải chia đôi, nhưng ánh sáng, âm thanh phải phù hợp yêu cầu bảo quản; trình chiếu bao trùm không thích hợp với hiện vật nhạy sáng. Phòng loại B và C có sáu hình thức tương tác theo mức tăng dần yêu cầu tổ chức không gian: tra cứu thông tin; thao tác vật lý; mô phỏng và thực tế ảo; nhập vai theo kịch bản; trải nghiệm đắm chìm đa giác quan; đồng sáng tạo.

Bảng 3. Ba loại phòng trưng bày theo vai trò của hiện vật gốc

Loại phòng	Vai trò của hiện vật	Mức phụ thuộc	Yêu cầu không gian chủ yếu
A - Phòng hiện vật	Hiện vật gốc là trung tâm; tương tác hỗ trợ diễn giải	C0 - C1	Ổn định vi khí hậu, chiếu sáng bảo quản, an ninh
B - Phòng hỗn hợp	Có hiện vật gốc; tương tác làm thay đổi cách sử dụng không gian	C1 - C2	Phân vùng hiện vật và vùng thiết bị, có vùng đệm; phục vụ từ hai phía
C - Phòng tương tác	Chỉ có bản sao, mô hình, hiện vật số	C1 - C2	Kiểm soát âm thanh - ánh sáng, sức chứa; điểm kỹ thuật sát phòng; khu chờ ngoài lối đi

Nguồn: Tác giả đề xuất

3.2.4. Sáu dạng cụm hoạt động tương tác

Trong phòng trưng bày, hoạt động trải nghiệm được tổ chức thành các cụm không gian thay vì từng thiết bị, vì theo chuyên gia, một trạm nhỏ vẫn chiếm nhiều diện tích khi có người thao tác, người đứng xem và người chờ. Các cụm được xác định theo bốn đặc điểm: (1) số người tham gia đồng thời; (2) thời gian sử dụng và nhu cầu chờ lượt; (3) quan hệ với tuyến tham quan; (4) yêu cầu kiểm soát âm thanh, ánh sáng. Từ đó, nghiên cứu đề xuất sáu dạng cụm điển hình:

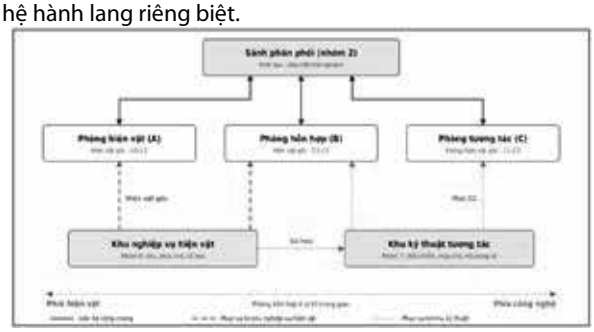
tiếp cận - quan sát nhanh; dừng cá nhân kéo dài; thao tác theo lượt; tương tác tập thể; nhập vai - đa giác quan; nghỉ - điều tiết.

3.3. Mô hình tổ chức không gian bảo tàng tương tác

Mô hình được xây dựng trên mối quan hệ hiện vật - con người - không gian: hiện vật đặt ra yêu cầu bảo quản và tiếp cận nghiệp vụ; con người quyết định hành trình tham quan; không gian kiến trúc kết nối, đáp ứng đồng thời các yêu cầu trên và bảo đảm vận hành hệ thống tương tác.

3.3.1. Nguyên tắc phục vụ hai phía

Khu trưng bày được tổ chức theo nguyên tắc phục vụ từ hai phía (Hình 2): phòng loại A và khu vực hiện vật của phòng loại B liên hệ với bộ phận nghiệp vụ hiện vật (nhóm 6); các phòng mức C2 được phục vụ từ khu kỹ thuật tương tác (nhóm 7). Phòng loại B cần tách hoạt động phục vụ hiện vật với lắp đặt, bảo trì thiết bị; đây là xung đột được 10/18 chuyên gia nhấn mạnh, vì ánh sáng, âm thanh, nhiệt từ thiết bị ảnh hưởng môi trường bảo quản. Nguyên tắc này nhấn mạnh quan hệ tiếp cận và tổ chức phục vụ, không nhất thiết bố trí hai hệ hành lang riêng biệt.



Hình 2. Sơ đồ nguyên tắc phục vụ hai phía: hiện vật và công nghệ

Nguồn: Tác giả đề xuất

3.3.2. Cấu trúc phân cấp tiếp cận và dây chuyền công năng

Các cấp tiếp cận T1-T4 (Bảng 2) được xác định theo tính chất sử dụng và yêu cầu kiểm soát, không nhất thiết là những vùng đồng tâm trên mặt bằng; T1 liên hệ trực tiếp với không gian đô thị. Trong dây chuyền công năng (Hình 3), khu trưng bày được tiếp cận từ nhóm 2 hoặc qua các phòng liên tiếp, tương tự cách Natural History Museum (London) cho khách chọn tuyến từ sảnh trung tâm Hintze Hall vào nhóm trưng bày hoặc nhóm trải nghiệm; nhóm 5 liên hệ với phòng trưng bày cùng chủ đề qua điểm kiểm soát; nhóm 6 và 7 có tuyến phục vụ riêng, trong đó phòng số hóa hiện vật là điểm kết nối giữa nghiệp vụ hiện vật và kỹ thuật tương tác.

3.3.3. Bốn tuyến vận hành và các yêu cầu bắt buộc

Mô hình tổ chức bốn tuyến vận hành: công chúng, hiện vật, kỹ thuật - dữ liệu và nhân viên - hàng hóa. Tuyến kỹ thuật - dữ liệu được tách riêng vì giao cắt giữa lắp đặt, bảo trì thiết bị với tuyến hiện vật được 10/18 chuyên gia nhấn mạnh; điểm giao thường xuất hiện tại cửa kho, thang hàng và khu phía sau phòng, không chỉ ở hành lang chính. Các tuyến không nhất thiết là hành lang riêng, nhưng cần xác định rõ đoạn phải tách biệt, vị trí dùng chung và điểm kết nối có kiểm soát, theo bảy yêu cầu:

(1) Tách biệt tuyến vận chuyển hiện vật với tuyến tham quan trong giờ mở cửa.

(2) Bố trí không gian kỹ thuật phục vụ phòng tương tác mức C2; công trình cải tạo không thể bố trí tuyến bảo trì riêng cần tổ chức bảo trì ngoài giờ tham quan, như chuyên gia đề xuất cho công trình cải tạo nhỏ.

(3) Bố trí các điểm kiểm soát tại vị trí chuyển tiếp giữa các cấp tiếp cận T1-T4.

(4) Tổ chức nhóm 1a có khả năng hoạt động tương đối độc lập với khu trưng bày.

(5) Bố trí nhóm 5 tại khu vực tiếp giáp giữa phòng trưng bày và bộ phận nghiệp vụ hoặc kỹ thuật liên quan, tiếp cận có kiểm soát từ T2.

(6) Bố trí phòng số hóa hiện vật tại vị trí kết nối giữa nhóm 6 và nhóm 7.

(7) Tách biệt khu tiếp nhận, cách ly hiện vật với khu tiếp nhận hàng hóa thông thường.

Bốn vị trí cần đặc biệt chú ý là phòng hỗn hợp loại B, ranh giới T2 - T3, không gian nhóm 2 và phòng số hóa hiện vật - nơi giao thoa giữa các tuyến hoặc cấp tiếp cận (các điểm ①–④ trên Hình 3).

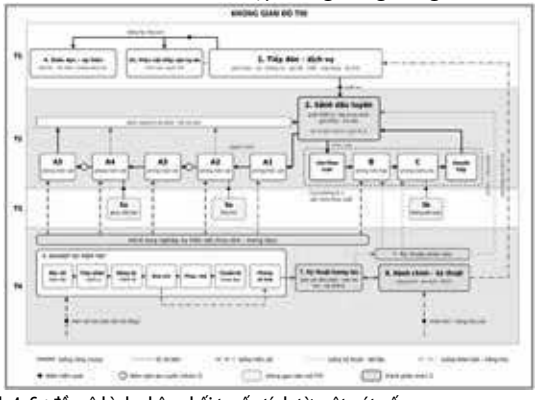


Hình 3. Sơ đồ mô hình chung tổ chức không gian bảo tàng tương tác

Nguồn: Tác giả đề xuất

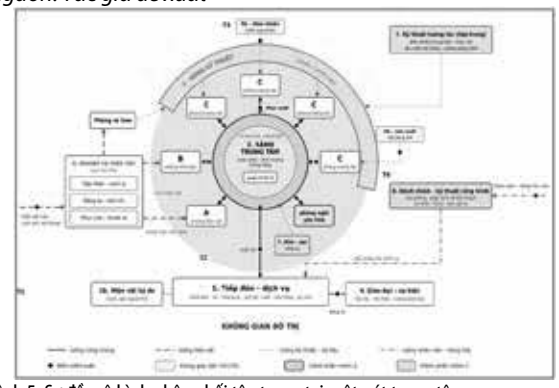
3.3.4. Ba mô hình biến thể theo cấu trúc phân phối

Cấu trúc phân phối khách tham quan quyết định cách tổ chức lối vào, sảnh phân phối và tuyến tham quan, nên được chọn làm cơ sở phát triển ba biến thể: (1) tuyến tính từ một nút gốc (Hình 4); (2) tập trung qua một nút trung tâm (Hình 5); (3) phân cấp qua nhiều nút theo cụm (Hình 6). Các biến thể có thể kết hợp trong cùng công trình (Bảng 4).



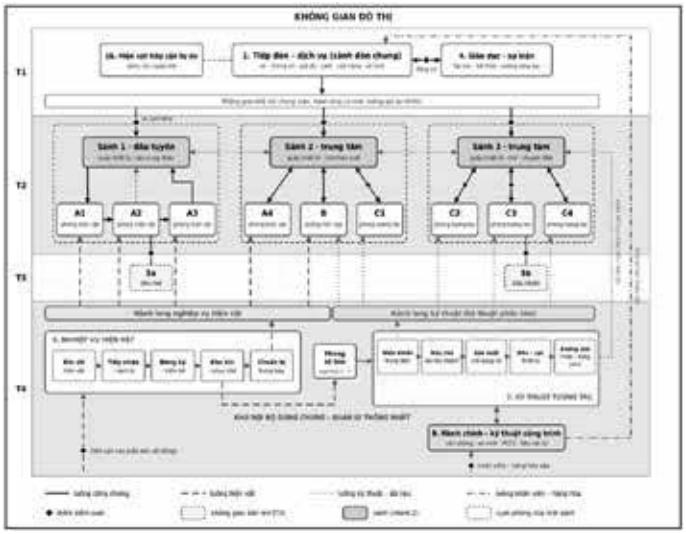
Hình 4. Sơ đồ mô hình phân phối tuyến tính từ một nút gốc

Nguồn: Tác giả đề xuất



Hình 5. Sơ đồ mô hình phân phối tập trung tại một nút trung tâm

Nguồn: Tác giả đề xuất



Hình 6. Sơ đồ mô hình phân phối phân cấp nhiều nút theo cụm

Nguồn: Tác giả đề xuất

Bảng 4. So sánh ba mô hình biến thể theo cấu trúc phân phối

Tiêu chí	Tuyến tính từ một nút gốc	Tập trung tại nút trung tâm	Phân cấp nhiều nút theo cụm
Lựa chọn hành trình	Theo trình tự các chặng	Chọn phòng, nhánh từ sảnh trung tâm	Chọn cụm, sau đó chọn phòng trong cụm
Tổ chức nhóm 6, 7	Dọc hoặc theo nhánh phía sau chuỗi phòng	Vòng hoặc mạng nhánh phía sau phòng	Hành lang nội bộ dùng chung tới từng cụm
Nguy cơ chính	Ùn tắc tại chặng chậm; mệt mỏi trên tuyến dài	Hàng chờ, giao cắt tập trung tại sảnh	Lặp quầy, tăng nhân lực; đứt mạch định hướng
Điều kiện áp dụng	Nội dung theo kịch bản; dãy phòng nối tiếp, công trình cải tạo	Nhiều chủ đề độc lập; mặt bằng mở, khẩu độ lớn	Nhiều khối, phát triển theo giai đoạn, mở cửa từng phần

Nguồn: Tác giả đề xuất

3.4. Thảo luận

So với cách phân khu hai tiêu chí và dây chuyền kho - phòng trưng bày trong các tài liệu hướng dẫn thiết kế [6, 7], kết quả nghiên cứu có hai điểm khác biệt. Thứ nhất, hệ thống tương tác được xem là yếu tố chi phối tổ chức không gian chứ không phải thiết bị bổ sung, phù hợp với quan điểm phân lớp công trình theo vòng đời [12]: lớp thiết bị có chu kỳ thay thế ngắn nên cần tuyến tiếp cận độc lập. Thứ hai, cấp bán mở T3 và phòng hỗn hợp B làm rõ hai vùng giao thoa mà cách phân khu công cộng - nội bộ chưa đề cập. Khác với các nghiên cứu cú pháp không gian [13, 14] chủ yếu phân tích công trình đã xây dựng, mô hình đề xuất đi từ quan hệ chức năng đến cấu trúc phân phối.

Với công trình xây mới, hệ thống phân loại có thể áp dụng khi lập nhiệm vụ thiết kế để xác định tỷ lệ phòng A, B, C, mức C0 - C2 và vị trí khối kỹ thuật tương tác. Với bảo tàng trong công trình thời Pháp thuộc, mô hình tuyến tính phù hợp với dãy phòng nối tiếp; phòng A giữ không gian gốc, phòng C bố trí ở phần mở rộng. Trong khí hậu nhiệt đới nóng ẩm, không gian nhóm 1, 2 có thể khai thác hiên, sân trong và thông gió tự nhiên, còn các phòng cần kiểm soát vi khí hậu được tập trung thành khối.

Hạn chế của nghiên cứu là các kết quả mới được kiểm chứng ở mức nguyên tắc thông qua phân tích công trình và ý kiến chuyên gia; cần tiếp tục đánh giá trên các dự án cụ thể.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu làm rõ những thay đổi trong tổ chức không gian kiến trúc bảo tàng theo xu hướng tăng cường trải nghiệm tương tác, với ba kết quả chính:

(1) Về cơ cấu không gian: Xác định ba nhóm không gian cần bổ sung, tuyến vận hành kỹ thuật - dữ liệu và sự phân hóa phòng trưng bày theo vai trò của hiện vật gốc và hoạt động tương tác.

(2) Về hệ thống phân loại: Đề xuất ba tiêu chí phân loại làm cơ sở xác định tám nhóm không gian, ba loại phòng trưng bày và sáu dạng cụm hoạt động, phù hợp với yêu cầu sử dụng và vận hành.

(3) Về mô hình tổ chức: Đề xuất mô hình chung dựa trên nguyên tắc phục vụ hai phía, phân cấp tiếp cận, phối hợp bốn tuyến vận hành và bảy yêu cầu tổ chức không gian; từ đó phát triển ba biến thể theo cấu trúc phân phối khách tham quan.

Bài báo kiến nghị vận dụng hệ thống phân loại và các yêu cầu tổ chức không gian khi lập nhiệm vụ thiết kế, thiết kế mới và cải tạo bảo tàng; bổ sung yêu cầu về không gian trải nghiệm, bán mở và kỹ thuật tương tác khi cập nhật tiêu chuẩn thiết kế bảo tàng. Các mô hình cần tiếp tục được kiểm chứng qua công trình cụ thể và đánh giá sau sử dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ICOM. Museum definition. International Council of Museums, 2022. Internet: https://icom.museum/en/resources/standards-guidelines/museum-definition/ (accessed: 9/2026).

[2] Thiên Điểu. Việt Nam đang có hàng vạn di tích được xếp hạng, hơn 300 bảo vật quốc gia. Báo Tuổi Trẻ Online, 23/12/2025. Internet: https://tuoitre.vn/viet-nam-dang-co-hang-van-di-tich-duoc-xep-hang-hon-300-bao-vat-quoc-gia-20251223184007351.htm (truy cập: tháng 9/2026).

[3] N. Simon. The Participatory Museum. Santa Cruz, CA, USA: Museum 2.0, 2010.

[4] J. H. Falk and L. D. Dierking. The Museum Experience Revisited. Walnut Creek, CA, USA: Left Coast Press, 2013.

[5] E. Hornecker and L. Ciolfi. Human-Computer Interactions in Museums. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2019.

[6] G. D. Lord, B. Lord and L. Martin (Eds.). Manual of Museum Planning: Sustainable Space, Facilities and Operations, 3rd ed. Lanham, MD, USA: AltaMira Press, 2012.

[7] E. Neufert and P. Neufert. Architects' Data, 4th ed. Oxford, U.K.: Wiley-Blackwell, 2012.

[8] Quốc hội. Luật Di sản văn hóa, Luật số 45/2024/QH15, ngày 23/11/2024.

[9] L. Corona. Stored collections of museums: An overview of how visible storage makes them accessible. Collection and Curation, vol. 44, no. 1, pp. 1-8, 2025, doi: 10.1108/CC-06-2023-0020.

[10] S. Bitgood. Museum fatigue: A critical review. Visitor Studies, vol. 12, no. 2, pp. 93-111, 2009, doi: 10.1080/10645570903203406.

[11] M. Mostafa. An architecture for autism: Concepts of design intervention for the autistic user. ArchNet-IJAR: International Journal of Architectural Research, vol. 2, no. 1, pp. 189-211, 2008. Internet: https://www.archnet.org/publications/5107 (accessed: 9/2026).

[12] S. Brand. How Buildings Learn: What Happens After They're Built. New York, NY, USA: Viking, 1994.

[13] B. Hillier and J. Hanson. The Social Logic of Space. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1984.

[14] B. Hillier and K. Tzortzi. Space syntax: The language of museum space. In: S. Macdonald (Ed.), A Companion to Museum Studies. Oxford, U.K.: Blackwell, pp. 282-301, 2006.

■Ngày nhận bài: 21/9/2026 ■Ngày sửa bài: 07/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng 14/10/2026

Doanh trại quân đội tích hợp chức năng phòng thủ dân sự: Kinh nghiệm quốc tế và những bài học

Organizing the spatial architecture of military barracks integrated with civil protection functions: International experience and lessons learned

> NGÔ HUYỀN TRÂM
Khoa Doanh trại, Học viện Hậu cần
Email: huyentramngo@gmail.com

TÓM TẮT

Doanh trại quân đội (DTQĐ), theo Luật Phòng thủ dân sự số 18/2023/QH15 [5], được xác định là một bộ phận của hệ thống công trình phòng thủ dân sự (PTDS), có khả năng đáp ứng chức năng phòng thủ, sơ tán, tiếp nhận, cứu trợ nhân dân và phối hợp chỉ huy, hiệp đồng tại chỗ. Trên thực tế, hệ thống DTQĐ hiện nay chỉ được tổ chức đáp ứng huấn luyện, sẵn sàng chiến đấu và sinh hoạt thường xuyên của bộ đội, chưa đáp ứng được các chức năng PTDS nêu trên. Bài viết tổng hợp và phân tích kinh nghiệm từ một số quốc gia trên thế giới về tổ chức không gian kiến trúc doanh trại theo hướng đa dụng, vừa đảm bảo quốc phòng an ninh, vừa tích hợp các chức năng ứng phó khẩn cấp, phục vụ dân sinh, đây là những chức năng cốt lõi của PTDS. Năm quốc gia được nhắc đến trong bài viết đại diện cho năm mô hình khác nhau: Thụy Sĩ (tổ chức hệ thống hầm ngầm phân tán), Hoa Kỳ (kiến trúc kết hợp quân sự và dân sự), Hàn Quốc (chuyển đổi chức năng công trình theo giai đoạn), Úc (chuyển đổi toàn hệ thống) và Pháp (chia sẻ tiện ích trong thời bình). Từ đó, bài viết rút ra bài học và đề xuất hướng áp dụng cho tổ chức không gian DTQĐ tại Việt Nam theo hướng tích hợp chức năng PTDS.

Từ khóa: Biến đổi linh hoạt; công trình lưỡng dụng; doanh trại quân đội; không gian ngầm; kịch bản khẩn cấp.

ABSTRACT

Military barracks, as defined by Civil Defense Law No. 18/2023/QH15 [5], are identified as a component of the civil defense (CD) works system, capable of fulfilling defense, evacuation, reception, relief of the population, and on-site command-coordination functions. In practice, however, the current system of military barracks is largely organized and architecturally designed only to serve training, combat readiness, and the daily life of troops, and has yet to meet the civil defense functions mentioned above. This article synthesizes and analyzes experience from a number of countries worldwide regarding the organization of site planning, master planning, and architectural design of barracks in a multi-purpose direction, simultaneously ensuring national defense and security while integrating emergency-response and civilian-serving functions, which are core functions of civil defense. Five countries discussed in the article represent five different models: Switzerland (organization of a dispersed underground shelter network); the United States (combined military-civilian architecture); South Korea (phased functional conversion of military installations); Australia (system-wide conversion) and France (sharing of facilities in peacetime). From this, the article draws lessons and proposes directions for applying the integration of civil defense functions into the spatial organization of military barracks in Vietnam.

Keywords: Flexible transformation; dual-use structures; military barracks; underground space; emergency scenarios.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Luật Phòng thủ dân sự số 18/2023/QH15 [5] xác định DTQĐ là một bộ phận của hệ thống công trình PTDS, có chức năng bảo vệ nhân dân, cơ quan, tổ chức và nền kinh tế quốc dân trong phòng, chống, khắc phục hậu quả sự cố, thảm họa, thiên tai, dịch bệnh, đồng thời chính thức hóa khái niệm công trình lưỡng dụng, tức công trình có công năng sử dụng kép cho cả hoạt động thường xuyên và hoạt động PTDS.

Trên thế giới, khái niệm công trình quân sự đa năng (dual-use military facility) đã được nhắc đến trong các nghiên cứu về quản lý rủi ro thảm họa và vận dụng vào thực tiễn từ lâu, đặc biệt ở các quốc gia có địa hình dễ chịu tác động thiên tai hoặc biên giới phức tạp. Cách tiếp cận chung là xác định các chức năng có thể bổ sung vào công trình quân sự khi xảy ra tình huống khẩn cấp, như tiếp nhận người dân lưu trú hoặc dự trữ vật tư. Ở Việt Nam, tổ chức không gian DTQĐ mới chỉ hướng đến các chức năng truyền thống, dựa trên yêu cầu huấn luyện, sẵn sàng chiến đấu và sinh hoạt. Trong khi đó, một số tình huống khẩn cấp như đại dịch COVID-19 hay bão số 10 (Bualoi) đã có công điện hỏa tốc huy động doanh trại làm nơi lưu trú, trú ẩn an toàn cho nhân

dân, cho thấy khoảng trống trong hệ thống nghiên cứu đối với công trình quân sự ở góc độ này.

Bài báo tổng hợp kinh nghiệm của năm quốc gia có mô hình tổ chức không gian doanh trại quân đội tích hợp chức năng phòng thủ dân sự: Thụy Sĩ, Hoa Kỳ, Hàn Quốc, Úc và Pháp, được lựa chọn dựa trên ba tiêu chí: có cơ chế pháp lý hoặc chính sách công khai về chia sẻ không gian quân sự và dân sự; có ví dụ cụ thể ở cấp độ mặt bằng và thiết kế kiến trúc; và đại diện cho các mô hình khác nhau về mức độ, cơ chế mở cửa, phù hợp để đối chiếu với điều kiện đặc thù của Việt Nam.

2. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VỀ TỔ CHỨC DTQĐ TÍCH HỢP CHỨC NĂNG PTDS

2.1. Tại Thụy Sĩ: Mô hình PTDS sự phân tán, tổ chức hệ thống ngầm

Thụy Sĩ là quốc gia có hệ thống pháp lý về phòng thủ dân sự lâu đời và toàn diện nhất trên thế giới. Năm 1963, Quốc hội Thụy Sĩ ban hành Luật Bảo vệ dân sự, đồng thời thành lập Cục Bảo vệ dân sự liên bang (BZS, nay là FOCP/BABS) để giám sát thực thi luật này.

Về mặt quy hoạch, điểm đặc biệt trong mô hình phòng thủ dân sự của Thụy Sĩ là thay vì xây dựng các khu quân sự biệt lập tách biệt hoàn toàn với đô thị, hệ thống đồn trạm, kho tàng và hạ tầng huấn luyện được bố trí phân tán, tận dụng địa hình đồi núi che chắn và phát triển không gian ngầm dưới các công trình công cộng, trong lòng đất đô thị. Quốc gia này xây dựng các khu tập luyện quân sự cấp bang (Waffenplatz), quản lý theo cơ chế mở có kiểm soát, gồm cả doanh trại, kho vũ khí, bãi bắn và khu huấn luyện, với lịch hoạt động, đặc biệt là lịch bắn đạn thật, được công bố công khai trên trang chủ chính thức của quân đội. Ngoài giờ huấn luyện, khu vực bãi tập được mở cửa cho người dân đi bộ, cưỡi ngựa hoặc cắm trại. Tại khu huấn luyện Wil (bang Nidwalden), các tòa nhà hội trường và khu nhà xưởng còn có thể được đặt lịch sử dụng cho mục đích dân sự, tức mặt bằng doanh trại được thiết kế đủ linh hoạt để cho thuê tổ chức sự kiện dân sự khi không có đơn vị huấn luyện.



Hình 1. Khu huấn luyện quân sự Waffenplatz Wil của quân đội Thụy Sĩ, tại khu vực Oberdorf gần đô thị Stans, bang Nidwalden [7]

Về mặt giải pháp kiến trúc, Luật Bảo vệ dân sự Thụy Sĩ quy định mọi công trình nhà ở xây mới, cả quân sự và dân sự, đều phải có hầm trú ẩn đạt tiêu chuẩn kỹ thuật, hoặc chủ đầu tư phải đóng góp vào quỹ công để xây hầm khu vực. Đến nay, tỷ lệ chỗ trú ẩn đã vượt quá số dân, với khoảng 360.000 hầm trú ẩn tư nhân và 2.300 hầm công cộng quy mô lớn [8], được xây dựng theo tiêu chuẩn kỹ thuật kép, có khả năng chịu lực cao, trang bị cửa chống áp lực và hệ thống lọc khí độc. Một công trình ngầm nổi bật là Bunker Sonnenberg, xây dựng trên tuyến cao tốc A2, gồm 7 tầng ngầm, có đầy đủ cơ sở hạ tầng thiết yếu và tầng trên cùng dành riêng cho hệ thống lọc sinh học, hóa học và hạt nhân. Hiện nay, hầm mở cửa cho công chúng qua tour tham quan mang tên "Unterirdisch Überleben" (Sống sót dưới lòng đất), đồng thời vẫn luôn sẵn sàng cho các tình huống khẩn cấp.



Hình 2. Lối vào Bunker Sonnenberg, công trình ngầm lưỡng dụng được xây dựng trên tuyến cao tốc A2, Thụy Sĩ [9]

Tương tự như Sonnenberg, trong thời bình, phần lớn các công trình ngầm tại Thụy Sĩ được khai thác cho mục đích dân sinh và kinh tế: làm kho chứa hàng, hầm rượu, phòng họp cộng đồng, xưởng thủ công, trung tâm dữ liệu, hoặc thậm chí cải tạo thành cơ sở lưu trú. Đây là minh chứng rõ nét cho việc một công trình phòng thủ có thể được thiết kế lại hoàn toàn để phục vụ mục đích dân sự lâu dài mà không đánh mất giá trị kỹ thuật của công trình gốc.

2.2. Tại Hoa Kỳ: Mô hình song hành quân sự và dân sự

Hệ thống doanh trại của lực lượng Vệ binh Quốc gia Hoa Kỳ xác định tính lưỡng dụng ngay từ khâu thiết kế ban đầu. Từ đầu thế kỷ 20, theo Luật Dân quân 1903 (Militia Act of 1903), các doanh trại được thiết kế với hạt nhân không gian là sảnh tập luyện (drill hall), một không gian nhịp lớn không cột giữa, đủ rộng để duyệt binh và cất giữ khí tài trong thời bình, nhưng có thể chuyển đổi ngay thành sân bóng rổ, sàn thi đấu hoặc phòng khánh tiết phục vụ sự kiện của thành phố. Những năm 1930, chính quyền liên bang khuyến khích các địa phương tự thiết kế doanh trại vệ binh của mình thay vì áp dụng mẫu thống nhất, khiến những tòa nhà này trở thành công trình biểu tượng của địa phương. Tiêu chuẩn thiết kế hiện hành của Vệ binh Quốc gia yêu cầu tích hợp sẵn năng lực làm nơi trú ẩn cho người dân bị ảnh hưởng thiên tai ngay trong hồ sơ thiết kế công trình mới, cho thấy tính lưỡng dụng đã trở thành tiêu chí thiết kế chính thức.

Trụ sở Trung đoàn 69, New York (Lexington Avenue Armory) là một trong những ví dụ được ghi nhận rõ nhất: sau vụ khủng bố ngày 11/9/2001, công trình này trở thành trung tâm hỗ trợ cho gia đình nạn nhân, sau đó trở thành điểm tập kết và tác chiến cho hơn 4.000 quân nhân trong bão Sandy năm 2012 và hơn 6.000 quân nhân trong ứng phó đại dịch COVID-19 năm 2020. Tất cả đều được tổ chức trên cùng một mặt bằng sảnh lớn (drill hall) vốn được thiết kế cho mục đích quân sự ngay từ đầu.



Hình 3. Không gian drill hall của Trụ sở Trung đoàn 69, New York (Lexington Avenue Armory) với kết cấu nhịp lớn không cột giữa, cho phép chuyển đổi linh hoạt giữa chức năng quân sự và chức năng cộng đồng [3]

Ngoài kiến trúc công trình, Bộ Quốc phòng Hoa Kỳ còn cho phép mở không gian doanh trại cho hoạt động kinh tế dân sự quy mô nhỏ. Từ năm 2015, qua chương trình phối hợp với Bộ Nông nghiệp, nhiều doanh trại như Fort Bragg, Fort Meade và Camp Lejeune tổ chức chợ nông sản định kỳ ngay tại bãi đỗ xe khu tiếp tế, cho phép nông dân địa phương bán sản phẩm trực tiếp cho quân nhân và gia đình. Bên cạnh đó, Chương trình Hạ tầng Cộng đồng Quốc phòng (DCIP), thiết lập theo Luật Ủy quyền Quốc phòng 2019 và do Văn phòng Hợp tác Cộng đồng Quốc phòng Địa phương (OLDCC) quản lý, tài trợ cho các dự án hạ tầng lân cận doanh trại như trường học, bệnh viện, trạm cứu hỏa, hệ thống cấp thoát nước, nhằm nâng cao khả năng chống chịu thiên tai của cả doanh trại và cộng đồng xung quanh, dù chương trình này không trực tiếp làm thay đổi mặt bằng bên trong hàng rào doanh trại [4].

2.3. Tại Hàn Quốc: Mô hình chuyển đổi theo giai đoạn

Trường hợp Hàn Quốc có giá trị tham chiếu đặc biệt vì thể hiện đầy đủ hai giai đoạn: mở cửa một phần trong khi doanh trại vẫn hoạt động, và chuyển đổi toàn bộ sau khi doanh trại ngừng chức năng quân sự.

Trong giai đoạn từ năm 1988 đến năm 1992, khi Doanh trại Yongsan (trụ sở quân đội Mỹ tại Hàn Quốc, đặt tại trung tâm Seoul) vẫn đang hoạt động bình thường, chính phủ Hàn Quốc đã tách một phần đất của doanh trại để xây dựng Công viên Gia đình Yongsan (Yongsan Family Park). Đây là công viên công cộng, cho phép người dân sử dụng từ năm 1992. Từ đây hình thành một tiền lệ quan trọng: doanh trại dành một dải đất ở vành ngoài cho công năng công cộng, trong khi phần lõi (khu chỉ huy, khu ở, khu hậu cần) vẫn được bảo toàn nguyên trạng chức năng quân sự, hình thành nguyên tắc "vùng đệm dân sự quanh lõi quân sự" [1].

Sau khi lực lượng Mỹ hoàn tất di chuyển về Trại Humphreys (Pyeongtaek) năm 2018, toàn bộ 243 ha đất Doanh trại Yongsan được chuyển đổi thành Công viên Yongsan theo bản quy hoạch tổng thể "Healing, Future Park" do liên danh West 8 (Hà Lan) và IROJE (Hàn Quốc) thắng cuộc thi thiết kế quốc tế năm 2012. Nguyên tắc thiết kế là xử lý phân cấp đối với các công trình quân sự cũ: bảo tồn 100% các công trình có giá trị lịch sử từ thời Nhật chiếm đóng, xây mới ngay trên vết chân của công trình cũ đã phá bỏ, thay vì quy hoạch lại từ đầu. Cách tiếp cận này cho phép công viên mới vừa đáp ứng nhu cầu sử dụng hiện đại, vừa lưu giữ lịch sử của khu vực từng đóng vai trò quân sự trong hơn một thế kỷ. Từ năm 2018, các đoàn xe buýt tham quan theo lộ trình cố định đã được tổ chức để đưa người dân khảo sát khu vực từng cấm hoàn toàn, trước khi công viên mở cửa chính thức.



Hình 4. Sơ đồ quy hoạch tổng thể Công viên Yongsan, Hàn Quốc, thể hiện ranh giới giữa khu vực phát triển công viên và khu vực lõi quân sự được giữ lại [1]

2.4. Tại Australia: Mô hình chuyển đổi khẩn cấp toàn hệ thống

Tính lưỡng dụng của hệ thống doanh trại quốc gia tại Australia đã được nâng lên thành chính sách và áp dụng đồng loạt. Sau thảm họa cháy rừng "Mùa hè Đen" diễn ra trong hai năm 2019 và 2020, Bộ Quốc phòng Australia chính thức xác định lực lượng phòng vệ (ADF) "chịu trách nhiệm nền tảng trong việc hỗ trợ sơ tán dân cư khi có thảm họa", theo bài viết chính thức trên trang Trung tâm Phát triển Sức mạnh Không quân, đồng thời được ghi nhận trong báo cáo của Ủy ban Hoàng gia điều tra các thỏa thuận ứng phó thảm họa thiên tai quốc gia [6]. Chính sách này quy định các căn cứ phải có khả năng tiếp nhận mọi thành phần cộng đồng, không phân biệt đối tượng.

Trong Chiến dịch Bushfire Assist, diễn ra từ năm 2019 đến năm 2020, hàng loạt doanh trại đang hoạt động trên nhiều bang của Australia được chuyển đổi đồng thời thành nơi trú ẩn và trung tâm chỉ huy hiệp đồng tại chỗ. Doanh trại Holsworthy (New South Wales) trở thành trung tâm hậu cần, kỹ thuật, y tế của Lực lượng Đặc nhiệm Liên quân; doanh trại Keswick điều phối cho Nam Australia và Tasmania; các doanh trại Latchford, Puckapunyal và Simpson tại Victoria trở thành nơi trú ẩn; căn cứ không quân RAAF East Sale và Wagga là điểm trung chuyển cho các chuyến bay sơ tán dân thường. Theo báo cáo của Bộ Cơ sở hạ tầng Australia, toàn bộ 72 căn cứ lớn cùng các khu huấn luyện trên cả nước đều nằm trong diện có thể huy động theo cơ chế này.

2.5. Tại Pháp: Mô hình chia sẻ tiện ích doanh trại thường xuyên

Khác với các mô hình chỉ được kích hoạt khi có khủng hoảng, quân đội Pháp chia sẻ trực tiếp các tiện ích thể thao, sinh hoạt với dân sự ngay trong lòng doanh trại đang hoạt động, thông qua cơ chế đăng ký và hợp tác chính thức với chính quyền địa phương, ở nhiều cấp độ quy mô khác nhau.

Ở cấp độ trụ sở Trung ương, Bể bơi Balard, trong khuôn viên bảo vệ của Bộ Quân lực Pháp (Ministère des Armées) tại Paris, xây dựng năm 2015, được mở cửa cho công dân ngoài quân đội từ năm 2018, sau khi đăng ký "Thẻ tiếp cận tạm thời" (TTAPB) qua một vòng điều tra hành chính. Ở cấp độ thấp hơn, bể bơi trong Doanh trại Reyniès tại xã Varces được chính quyền địa phương xác nhận là nơi tiếp cận chung cho quân nhân, học sinh của xã và hội viên các hiệp hội thể thao dân sự, nghĩa là trẻ em địa phương học bơi ngay trong doanh trại đang hoạt động. Ở cấp độ đơn vị chiến đấu, Căn cứ không quân 118 (Mont-de-Marsan) khánh thành năm 2021 một nhà thi đấu đa năng phục vụ 3.000 quân nhân, đồng thời phục vụ người dân thành phố qua hợp tác với các hiệp hội thể thao, củng cố mối liên kết giữa quân đội và người dân địa phương [2].

Điểm chung của ba ví dụ là cơ chế kiểm soát ra vào tách biệt: khu vực thể thao, sinh hoạt được đặt ở vị trí có thể bố trí lối tiếp cận riêng cho dân sự (cổng phụ, vòng kiểm soát danh tính), không đi qua hoặc ảnh hưởng đến khu vực tác chiến, cho phép duy trì đồng thời cả an ninh quân sự và quyền tiếp cận thường xuyên của dân sự.

3. BÀI HỌC TỪ KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VỀ TỔ CHỨC DTQĐ TÍCH HỢP CHỨC NĂNG PTDS

Từ các mô hình đã phân tích, có thể rút ra năm bài học kinh nghiệm cho tổ chức không gian doanh trại quân đội tích hợp chức năng phòng thủ dân sự. Đối chiếu với yêu cầu của Luật Phòng thủ dân sự 2023 và thực tiễn DTQĐ Việt Nam, mỗi bài học được gắn với một hướng vận dụng cụ thể.

3.1. Phân vùng lõi và vành đai.

Các mô hình doanh trại tích hợp chức năng PTDS đã phân tích đều đặt vùng lõi bảo mật (chỉ huy, kho vũ khí, khu tác chiến) ở vị trí trung tâm hoặc sâu trong địa hình, trong khi các phân khu phụ trợ (thao trường, khu thể thao, khu dịch vụ) được đặt ở vành ngoài, tiếp giáp ranh giới đô thị hoặc dân cư, cho phép chuyển đổi công năng

hoặc mở cửa cho dân sự mà không ảnh hưởng đến vùng lõi tác chiến, thể hiện rõ nhất qua mô hình Yongsan Family Park ở Hàn Quốc và hệ thống khu huấn luyện quân sự cấp bang ở Thụy Sĩ. Vận dụng vào Việt Nam, có thể phân vùng kiến trúc DTQĐ theo ba vòng: vòng ngoài là vùng đệm, bố trí khu tăng gia sản xuất, khu thể thao, khu tiện ích dân sự, cho phép người dân tiếp cận có kiểm soát; vòng giữa là khu ở và sinh hoạt của quân nhân; vòng trong là khu sở chỉ huy, giữ nguyên trạng thái đóng.

3.2. Thiết kế lối tiếp cận riêng cho khu chia sẻ tiện ích với dân sự

Cần tách biệt hoàn toàn về giao thông và kiểm soát ra vào giữa các khu chia sẻ tiện ích dân sự với khu vực lõi bí mật quân sự, cho phép người dân tiếp cận thường xuyên mà không ảnh hưởng đến an ninh quốc phòng. Cơ chế cổng phụ và vòng kiểm soát danh tính riêng cho dân sự tại các doanh trại chia sẻ tiện ích của Pháp là ví dụ cụ thể cho nguyên tắc này. Đối với DTQĐ Việt Nam, lối ra vào cho từng phân khu, đặc biệt lối đi riêng cho dân sự, cần được tổ chức độc lập, không đi qua khu trung tâm chỉ huy hay khu vực tác chiến có yêu cầu bảo mật cao.

3.3. Thiết kế kết cấu nhịp lớn cho công trình đa năng

Kinh nghiệm thiết kế sảnh huấn luyện (drill hall) của Hoa Kỳ cho thấy một loại không gian kiến trúc có thể tiếp nhận cả hoạt động quân sự và hoạt động dân sự, cứu trợ (nơi tránh trú, bệnh viện dã chiến, sự kiện cộng đồng) mà không cần cải tạo kết cấu, hiệu quả hơn so với thiết kế công trình quân sự thuần túy rồi mới cải tạo thích ứng khi có sự cố. Theo nguyên lý này, các công trình như hội trường, nhà ăn của DTQĐ Việt Nam có thể được thiết kế với nhịp lớn, ít cột giữa, đủ khả năng tiếp nhận số lượng người vượt quân số thường trực trong thời gian ngắn. Điều này đòi hỏi rà soát lại thiết kế hiện nay, vì phần lớn hội trường, nhà ăn cấp tiểu đoàn có nhịp kết cấu chính chỉ từ 9 đến 13 mét, chưa đáp ứng yêu cầu chuyển đổi trong tình huống khẩn cấp.

3.4. Công khai lịch trình và quy chế sử dụng chung

Hệ thống khu huấn luyện quân sự cấp bang của Thụy Sĩ và chương trình chợ nông sản của Hoa Kỳ cho thấy tính mở bền vững không thể chỉ dựa vào thiết kế công trình, mà cần cơ chế quản lý minh bạch, như lịch sử dụng công khai, quy định khung giờ và khu vực được phép tiếp cận, để duy trì đồng thời an ninh quân sự và quyền tiếp cận của dân cư. Với các hạng mục DTQĐ Việt Nam chia sẻ tiện ích với người dân, có thể xây dựng quy chế phối hợp với chính quyền xã, phường về thời gian, điều kiện và đối tượng tiếp cận, vừa gắn kết quân dân, vừa tạo tiền lệ vận hành minh bạch để kích hoạt nhanh khi có tình huống khẩn cấp.

3.5. Thể chế hóa trách nhiệm ứng phó khẩn cấp ở cấp quốc gia

Kinh nghiệm của Australia, nơi Bộ Quốc phòng xác định trách nhiệm hỗ trợ ứng phó thảm họa của lực lượng phòng vệ thành chính sách quốc gia áp dụng đồng loạt cho toàn bộ hệ thống căn cứ, cho thấy tính lưỡng dụng chỉ phát huy hiệu quả ở quy mô lớn khi có khung pháp lý và thể chế thống nhất, thay vì dựa vào sáng kiến riêng lẻ của từng đơn vị. Việt Nam cần xây dựng quy định cụ thể về trách nhiệm và điều kiện tiếp nhận dân sự cho toàn bộ hệ thống DTQĐ, làm cơ sở pháp lý thống nhất thay vì để từng đơn vị tự quyết định. Tuy nhiên, vận dụng kinh nghiệm quốc tế không đồng nghĩa với sao chép nguyên trạng. Mức độ mở của DTQĐ Việt Nam cần được cân nhắc thấp hơn so với các mô hình dân sự hóa triệt để như ở Thụy Sĩ, do yêu cầu bảo mật đặc thù ở Việt Nam, đặc biệt tại địa bàn biên giới. Hướng đi phù hợp nhất là chỉ mở phần không gian phi tác chiến ở vành ngoài, giữ nguyên vòng lõi tác chiến, chỉ huy và bảo mật ở trạng thái đóng.

4. KẾT LUẬN

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy việc tích hợp chức năng PTDS vào DTQS không phải là một giải pháp kỹ thuật tình huống, mà là kết quả của quá trình tổ chức không gian kiến trúc có chủ đích, được luật hóa hoặc thể chế hóa ở các mức độ khác nhau tùy điều kiện từng quốc gia. Năm mô hình được phân tích, Thụy Sĩ, Hoa Kỳ, Hàn Quốc, Australia và Pháp, cho thấy những bài học về phân vùng lõi và vành đai, kết cấu nhịp lớn đa năng, tổ chức lối tiếp cận độc lập, công khai hóa quy chế sử dụng chung và thể chế hóa trách nhiệm ứng phó khẩn cấp cấp quốc gia. Đây là những kinh nghiệm có thể vận dụng có chọn lọc vào tổ chức không gian kiến trúc DTQĐ tại Việt Nam, góp phần cụ thể hóa yêu cầu của Luật Phòng thủ dân sự 2023 vào thực tiễn thiết kế, đồng thời không làm suy giảm yêu cầu bảo mật và khả năng sẵn sàng chiến đấu của đơn vị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hyeyoung Choi, Young-Ai Seo. The process of creating Yongsan Park from the urban resilience perspective. Sustainability, vol. 11, no. 5, p. 1225, 2019, doi: 10.3390/su11051225.

[2] Ministère des Armées. Sur la BA 118, un nouveau gymnase pour les militaires et les Montois. defense.gouv.fr, 2021. Internet: https://www.defense.gouv.fr/sga/actualites/ba-118-nouveau-gymnase-militaires-montois (accessed: 9/2026).

[3] New York State Office of General Services. Lexington Avenue Armory. ogs.ny.gov, 2026. Internet: https://ogs.ny.gov/lexington-avenue-armory (accessed: 9/2026).

[4] Office of Local Defense Community Cooperation, U.S. Department of Defense. Defense Community Infrastructure Program (DCIP). oldcc.gov, 2024. Internet: https://oldcc.gov/defense-community-infrastructure-program-dcip (accessed: 10/2026).

[5] Quốc hội. Luật Phòng thủ dân sự. Luật số 18/2023/QH15, ngày 20/6/2023. Internet: https://vbpl.moj.gov.vn/TW/Lists/vbpq/Attachments/167216/18.2023.QH15.doc (truy cập: tháng 9/2026).

[6] Royal Commission into National Natural Disaster Arrangements. Chính phủ Australia. Chapter 7: Role of the Australian Defence Force, in Royal Commission into National Natural Disaster Arrangements, Report, 2020. Internet: https://oia.pmc.gov.au/sites/default/files/posts/2022/11/Royal%20Commission%20into%20National%20Natural%20Disaster%20Arrangements%20-%20Report%20%5Baccessible%5D.pdf (accessed: 9/2026).

[7] Swiss Armed Forces, VBS/DDPS. Wil military training area. vtg.admin.ch, 2025. Internet: https://www.vtg.admin.ch/en/waffenplatz-wil-en (accessed: 10/2026).

[8] Swiss National Museum. Shelters, a Swiss phenomenon. blog.nationalmuseum.ch, 2022. Internet: https://blog.nationalmuseum.ch/en/2022/04/shelters-a-swiss-phenomenon/ (accessed: 9/2026).

[9] SwissCommunity, Swiss Revue. Sonnenberg bunker is drawing attention due to the war in Ukraine. swisscommunity.org, 2022. Internet: https://www.swisscommunity.org/en/news-media/swiss-revue/article/sonnenberg-bunker-is-drawing-attention-due-to-the-war-in-ukraine (accessed: 9/2026).

■Ngày nhận bài: 02/7/2026 ■Ngày sửa bài: 10/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/8/2026

Giải pháp kiến trúc nhà ở khu vực Kinh thành Huế trong điều kiện phát triển đô thị di sản

Architectural solutions for Housing in the Hue imperial citadel under the context of heritage urban development

> KTS LÊ ANH TÚ[1], TS.KTS NGUYỄN SONG HOÀN NGUYÊN[2,*]
[1]HVCH Viện Sau Đại học, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]Khoa Kiến trúc, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[*]Email: nguyen.nguyensonghoan@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã đề cập đến kiến trúc nhà ở truyền thống (NOTT) và mô hình nhà ở thích ứng với đô thị Huế. Tuy nhiên, phần lớn mới dừng ở phân tích, mô tả và nhận diện, chưa chuyển hóa các giá trị truyền thống thành nguyên tắc, tiêu chí và công cụ thiết kế cho phát triển nhà ở trong bối cảnh đô thị di sản. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung nhận diện, hệ thống hóa đặc trưng kiến trúc NOTTT và đề xuất phương thức tiếp biến các giá trị này trong phát triển nhà ở tại Kinh thành Huế. Nghiên cứu sử dụng phương pháp điền dã, phân tích - tổng hợp, và mô phỏng 3D. Kết quả xác lập 14 yếu tố đặc trưng, đề xuất hai quan điểm phát triển và hệ thống giải pháp cho ba khu vực đặc thù, được cụ thể hóa bằng Khung hướng dẫn thiết kế (Design Code).

Từ khóa: Đô thị di sản; Kinh thành Huế; nhà ở truyền thống; bảo tồn và phát triển; hướng dẫn thiết kế.

ABSTRACT

Many studies in Vietnam and abroad have dis-cussed traditional housing architecture and adaptive housing models in Hue's urban context. However, most of them mainly focus on analysis, description, and identification. They have not clearly transformed traditional values into design principles, criteria, and tools for housing development in the context of a heritage city. Based on this gap, the study focuses on identifying and systematizing the architectural characteristics of traditional housing. It also proposes ways to adapt these values in housing development within the Hue Citadel. The study uses fieldwork, document analysis and synthesis, and 3D simulation. The results identify 14 key characteristics, propose two development viewpoints, and suggest a system of solutions for three specific areas. These are further developed into a Design Code to support housing design and heritage urban management.

Keywords: Heritage urban area; Hue Citadel; traditional housing; conservation and development; design code.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kinh thành Huế được triều đình nhà Nguyễn (vua Gia Long) triển khai xây dựng từ năm 1805, sau đó được mở rộng, củng cố và hoàn thiện dưới các triều vua kế tiếp, tạo thành quần thể kinh đô thống nhất, kết hợp quy hoạch phòng thủ với chức năng nghi lễ, hành chính và văn hóa.

Năm 1993, UNESCO chính thức công nhận Quần thể di tích Cố đô Huế là di sản văn hóa thế giới. Theo UNESCO, đây là "ví dụ nổi bật của một kinh đô phong kiến được quy hoạch hài hòa giữa kiến trúc, cảnh quan thiên nhiên và tổ chức xã hội" [20]. Từ sau năm 1993, nhiều chính sách bảo tồn và quản lý đô thị đã được triển khai nhằm bảo vệ giá trị di sản. Nghị quyết số 54-NQ/TW ngày 10/12/2019 cũng định hướng phát triển TP Huế đến 2025 trở thành thành phố trực thuộc Trung ương trên nền tảng bảo tồn, phát huy di sản cố đô và bản sắc văn hóa Huế.

Tuy nhiên trong bối cảnh đô thị hóa diễn ra nhanh chóng như hiện nay, Huế đang đối mặt với những vấn đề gây ảnh hưởng đến tính toàn vẹn di sản. Nguyên nhân là do thiếu công cụ quản lý hiệu quả và khung hướng dẫn thiết kế cụ thể. Trong lĩnh vực nhà ở cũng ghi nhận nhiều giải pháp kiến trúc chưa tương thích với giá trị và cảnh quan đặc thù của Kinh thành, đặc biệt là khu vực kế cận lõi di sản như Hoàng thành và các công trình di tích đền, miếu.

Trong khi đó, theo Khuyến nghị về cảnh quan đô thị lịch sử (Historic Urban Landscape - UNESCO, 2011) [12], dù không đưa ra các quy định thiết kế thống nhất cho toàn bộ đô thị lịch sử, nhưng HUL nhấn mạnh đến việc nhận diện các lớp giá trị và đặc trưng của từng khu vực, đồng thời áp dụng công cụ quản lý và giải pháp thiết kế thích ứng với bối cảnh địa phương. Tương tự, nhiều văn kiện của ICOMOS cũng đề cao sự tôn trọng bối cảnh, như Tuyên ngôn Tây An (*Xi'an Declaration, 2005*) [8] yêu cầu bảo tồn phải xem xét toàn bộ bối cảnh của di sản, bao gồm mối quan hệ không gian, cảnh quan và môi trường xung quanh, chứ không chỉ bản thân công trình. Các quan điểm này đã tạo cơ sở lý luận cho việc phân vùng nghiên cứu, từ đó chuyển hóa thành Khung hướng dẫn thiết kế (Design Code) kiến trúc nhà ở (KTNO) cho từng khu vực đặc trưng tại Kinh thành. Kết quả nghiên cứu là một đóng góp khoa học nhằm bảo tồn và phát huy giá trị di sản Cố đô Huế.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Dữ liệu

Để thu thập dữ liệu, nghiên cứu chọn lọc 10 NOTT Huế tiêu biểu được xây dựng trong khu vực Kinh thành từ khoảng 1835-1945, trong tổng số 91 NOTT đã được Nguyễn Ngọc Tùng khảo sát [19], nhằm thiết lập cơ sở tham chiếu đặc điểm kiến trúc truyền thống. Ngoài ra, nghiên cứu còn khảo sát thêm nhiều ngôi nhà xây dựng từ 1960s đến nay, gồm biệt thự và nhà phố, nhằm nhận diện thực trạng ứng xử với bối cảnh đô thị lịch sử và khả năng khai thác truyền thống trong KTNO. Những ngôi nhà này phân bố tại ba khu vực đặc trưng của Kinh thành Huế: vùng cận lõi di sản (đường Lê Huân, Đặng Thái Thân, Đoàn Thị Điểm); vùng đệm (đường Mai Thúc Loan, Nguyễn Trãi, Yết Kiêu, Đinh Tiên Hoàng), vùng cảnh quan sông hồ (đường Tịnh Tâm, Nguyễn Quang Bích, Trần Văn Kỷ, Trần Quý Cáp).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- *Phương pháp khảo sát điền dã:* nhằm đánh giá hiện trạng, thu thập dữ liệu và hình ảnh thực tế của KTNO trong Kinh thành Huế.

- *Phương pháp phân tích - tổng hợp:* nhằm tập hợp và phân tích dữ kiện, hệ thống hóa cơ sở khoa học phục vụ cho yêu cầu đề xuất giải pháp thiết kế kiến trúc.

Ngoài ra, nghiên cứu sử dụng công nghệ 3D (Gemini) như là công cụ để mô phỏng không gian hiện trạng và giải pháp KTNO theo các khu vực đặc trưng trong Kinh thành.

3. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

3.1. Vai trò của NOTT trong Kinh thành Huế

Từ góc nhìn nghiên cứu đô thị, nhiều học giả Việt Nam nhấn mạnh sự cần thiết của hệ thống nhà ở trong cấu trúc Kinh thành Huế. Phan Thuận An cho rằng Huế không chỉ là một kinh đô với hệ thống cung điện mà còn là một đô thị với đầy đủ các khu cư trú, chợ búa và làng nghề, tạo nên đời sống xã hội phong phú của Kinh thành [1]. Trong khi đó, các học giả quốc tế cho rằng KTNO truyền thống đóng vai trò quan trọng trong việc bảo tồn tính toàn vẹn của các đô thị lịch sử. Theo Bręczewska-Kulesza, NOTT cùng với cấu trúc đô thị và cảnh quan tạo nên những thành phần thiết yếu của di sản kiến trúc và văn hóa tại các thành phố lịch sử [13].

Như vậy trong Kinh thành Huế, NOTT không chỉ có giá trị kiến trúc mà còn mang ý nghĩa xã hội và văn hóa sâu sắc, và được xem là lớp "*di sản sống*", đóng vai trò chuyển tiếp giữa cung đình và đời sống dân sự.

3.2. Đặc trưng KTNO truyền thống Huế

NOTT Huế phát triển đa dạng với nhiều loại hình khác nhau, tuy nhiên phổ biến có hai loại chính: nhà vườn truyền thống và nhà phố thương mại.

3.2.1. Nhà vườn truyền thống

Theo Nguyễn Hữu Thông [3], cấu trúc không gian của nhà vườn thường được tổ chức theo trục phong thủy gồm cổng, bình phong, bể cạn, sân trước, nhà chính (nhà Rường) và khu vườn phía sau. Loại hình nhà ở này không chỉ phản ánh kỹ thuật xây dựng truyền thống mà còn thể hiện triết lý sống của cư dân Huế - đề cao sự hài hòa giữa con người và thiên nhiên. Nhà vườn truyền thống vì vậy trở thành một yếu tố quan trọng tạo nên bản sắc cảnh quan của đô thị Huế, trong đó ngôi nhà thường có quy mô vừa phải, thấp tầng, nằm lọt giữa khu vườn rộng với nhiều lớp cây xanh. Nguyễn Ngọc Tùng đánh giá rằng *"nhà vườn Huế còn giữ được cấu trúc hình thái tương đối nguyên vẹn, với mật độ xây dựng thấp và sự cân bằng giữa nhà và vườn"* [4].

3.2.2. Nhà phố thương mại truyền thống

Trong quá trình phát triển, tại Huế xuất hiện phổ biến loại hình nhà ở kết hợp thương mại dọc theo các trục đường và khu dân cư. Đây là loại hình kiến trúc đô thị đặc trưng với mặt tiền tiếp xúc vỉa hè, phản ánh sự thích ứng của kiến trúc truyền thống trong điều kiện đô thị hóa sớm. Theo Võ Sỹ Châu - Lê Văn Thanh Hùng, về hình thức thì "*Các công trình này được xây dựng theo kiểu nhà truyền thống 3 gian có chái hoặc không chái, cao 1 tầng hoặc 2 tầng. Kiểu kiến trúc của các công trình này mang nét tương đồng với những ngôi nhà ở phố cổ Hội An (Quảng Nam)* [2]. Ngoài ra, hình thức kiến trúc còn mang tính đồng nhất theo dãy phố, với chiều cao thấp, mái ngói liên tục và vật liệu tương đồng. Sự lặp lại của các đơn vị nhà ở liền kề dọc theo tuyến phố tạo nên nhịp điệu kiến trúc đặc trưng, góp phần hình thành không gian đô thị thương mại liên tục, phản ánh rõ nét mối quan hệ giữa KTNO và hoạt động kinh tế trong bối cảnh đô thị lịch sử.

3.2.3. Phân nhóm đặc điểm KTNO truyền thống Huế

Bằng việc khảo sát và phân tích dữ liệu từ các NOTT tiêu biểu trong và ngoài khu vực Kinh thành, bao gồm nhà vườn và nhà phố thương mại, nghiên cứu đã chọn lọc được 14 đặc điểm cơ bản làm cơ sở nhận diện hình thức KTNO truyền thống Huế. Ngoài ra, nghiên cứu còn tiến hành thiết lập cơ sở tham chiếu theo các nhóm vấn đề: 1) Nguyên tắc quốc tế và pháp lý Việt Nam về phát triển KTNO trong đô thị di sản *(Hiến chương Venice -1964* [6]*; Hiến chương Burra -1979* [5]*; Hiến chương ICOMOS - 1999* [7]*; Nghị quyết ICOMOS - 2010* [17]*; UNESCO: HUL - 2011* [12]*; Quy chế bảo vệ di sản Khu phố cổ Hội An* [9]*; Quyết định số 1086/QĐ-UBND về việc điều chỉnh, bổ sung một số nội dung của Điều lệ (Quy định) quản lý xây dựng theo đồ án Quy hoạch chi tiết Khu Kinh thành Huế, TP Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế (2017)* [10]*; Quyết định số 3280/QĐ-UBND phê duyệt Quy hoạch phân khu (tỷ lệ 1/2000) Khu Kinh thành Huế (2024)* [11]*;* 2) Lý thuyết về phát triển đô thị di sản và quan điểm tiếp biến truyền thống của KTS danh tiếng thế giới (Tadao Ando, Balkrishna Doshi, Wang Shu, Glenn Murcutt [14 - 17]; 3) Bài học thực tiễn trong phát triển nhà ở tại đô thị cổ Hội An (Việt Nam), cố đô Kyoto (Nhật Bản) và đô thị cổ Luang Prabang (Lào) [21]. Tùy theo nhóm vấn đề mà các đặc điểm truyền thống có sự thay đổi vai trò và mức độ biểu hiện khác nhau; tuy nhiên sau khi tổng hợp các chỉ số tham chiếu thì nhận thấy có thể chia 14 đặc điểm thành hai nhóm (Bảng 1), gồm *Nhóm quan trọng* (tổng điểm tham chiếu ≥3) với 07 đặc điểm: *Vật liệu, không gian hiên, mái, hình khối, tỷ lệ, chiều cao, hệ thống cửa*; và *Nhóm ít quan trọng* với 07 đặc điểm còn lại: *trang trí truyền thống, khoảng lùi, nhịp điệu tuyến phố, cảnh quan sân vườn, bảng hiệu, màu sắc đặc trưng, logia/ban công*.

Bảng 1. Phân nhóm đặc điểm KTNO truyền thống Huế theo các hệ tham chiếu

STT	ĐẶC ĐIỂM KTNO TRUYỀN THỐNG HUẾ (Hệ tham chiếu cơ sở)		THAM CHIẾU [01] (Nguyên tắc Quốc tế & Pháp lý VN)	THAM CHIẾU [02] (Lý thuyết phát triển đô thị di sản)	THAM CHIẾU [03] (Quan điểm tiếp biến truyền thống)	THAM CHIẾU [04] (Đô thị di sản điển hình)	TỔNG ĐIỂM	PHÂN NHÓM
1	**KG hiên**	Hiên sâu, mái vươn xa Không gian chuyển tiếp	X	X	X	X	**4**	**QUAN TRỌNG**
2	**Vật liệu**	Ngói, gỗ, gạch	X	X	X	X	**4**	
3	**Mái**	Mái dốc, lợp ngói	X	X	X	X	**4**	

		liệt/âm dương 04 mái hay 2 mái, đối xứng						
4	**Hình khối**	Trải theo phương ngang Đối xứng		X	X	X	**3**	
5	**Tỷ lệ**	Hài hòa giữa mái-thân-nền Cân bằng	X	X	X	X	**4**	
6	**Chiều cao**	Thấp tầng, gần gũi	X	X	X	X	**4**	
7	**Cửa**	Cửa gỗ bức bàn Linh hoạt (tháo lắp)	X		X	X	**3**	
8	**Trang trí**	Trang trí dân gian, truyền thống, tinh tế, mang tính biểu tượng			X	X	**2**	**ÍT QUAN TRỌNG**
9	**Khoảng lùi**	Luôn có (nhà vườn) Không có (nhà phố thương mại)	X	X			**2**	
10	**Nhịp điệu tuyến phố**	Tuyến phố liên tục, đặc trưng	X			X	**2**	
11	**Cảnh quan sân vườn**	Sân vườn trước - sau (nhà vườn) Sân trong (nhà ở đô thị)	X		X		**2**	
12	**Bảng hiệu**	Tạo bản sắc phố thương mại				X	**1**	
13	**Màu sắc**	Màu trầm, tự nhiên			X	X	**2**	
14	**Logia/ban công**	Chức năng sinh hoạt, quan sát		X			**1**	

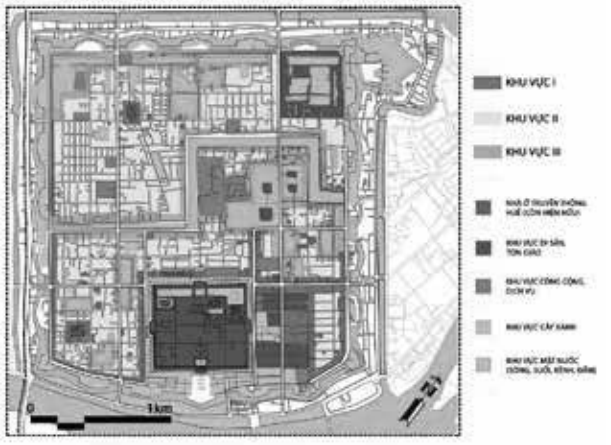
4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Phân vùng ứng xử kiến trúc trong khu vực Kinh thành Huế

Trước hết, cần tham khảo văn bản "*Kế hoạch bảo vệ và phát huy giá trị quần thể di sản Huế*" được UBND tỉnh Thừa Thiên Huế và Bộ Văn hóa ban hành vào ngày 23/07/1992. Đối với khu vực Kinh thành, kế hoạch này khi đó không chỉ phân khu vực bảo vệ nghiêm ngặt các bức tường thành, các di tích và hồ nước bên trong Kinh thành (Khu vực I), mà còn mở rộng phạm vi sang vùng đệm là các khu dân cư bên trong Kinh thành - nơi lưu giữ cấu trúc đô thị truyền thống và các giá trị văn hóa phi vật thể gắn với đời sống cộng đồng (Khu vực II).

Trên cơ sở vận dụng các nguyên tắc của HUL và ICOMOS vào bối cảnh Huế, nghiên cứu đề xuất định hướng phân vùng ứng xử kiến trúc trong Kinh thành theo ba khu vực chính với những đặc trưng kiến trúc và cảnh quan khác nhau (Bảng 2).

Bảng 2. Phân vùng ứng xử kiến trúc trong Kinh thành Huế *(Nguồn: Tác giả)*

Phân vùng ứng xử	Mô tả chi tiết	Hình ảnh minh họa
Khu vực I (vùng lõi)	Là khu dân cư đô thị tiếp cận trực tiếp và liền kề với lõi di sản, bao gồm Hoàng Thành và hệ thống các công trình tôn giáo - tín ngưỡng như đền, miếu, chùa cổ.	
Khu vực II (Vùng đệm)	Là vùng đệm, bao gồm các khu dân cư đô thị nằm ngoài Khu vực I, đóng vai trò chuyển tiếp giữa khu vực lõi di sản và các khu vực phát triển đô thị rộng hơn	
Khu vực III (Vùng cảnh quan sông hồ)	Bao gồm các khu dân cư phân bố dọc theo các tuyến sông và mặt nước như sông Ngự Hà, hồ Tịnh Tâm, hồ Tàng Thư, hồ Xã Tắc… với đặc trưng cảnh quan sông nước rõ nét.	

4.2. Quan điểm phát triển KTNO khu vực Kinh thành Huế

- ***Quan điểm 1:*** Trên cơ sở tổng hợp các nguyên tắc quốc tế và pháp lý trong nước, nghiên cứu đề xuất bốn tính chất làm nền tảng lý luận cho việc thiết lập tiêu chí thiết kế và quản lý phát triển kiến trúc nhà ở trong khu vực Kinh thành Huế như sau (Bảng 3)

Bảng 3. Các tính chất phát triển KTNO trong Kinh thành Huế và phạm vi áp dụng

STT	TÍNH CHẤT	NỘI DUNG CHÍNH	MỤC TIÊU	CƠ SỞ LÝ LUẬN	ĐỊNH HƯỚNG ÁP DỤNG	Khu vực I	Khu vực II	Khu vực III
1	**Tính toàn vẹn**	Bảo vệ cấu trúc không gian đô thị, mối quan hệ: Nhà - vườn - cảnh quan - đường phố/mặt nước	Duy trì giá trị di sản tổng thể	Venice (1964), HUL (2011)	Kiểm soát chiều cao, mật độ, tầm nhìn	**X**		x
2	**Tính hài hòa**	Cân bằng bảo tồn và phát triển, đảm bảo tương thích hình thái	Tránh xung đột kiến trúc mới - cũ	Burra (1979), ICOMOS (2010)	Kiểm soát tỷ lệ, vật liệu, mặt đứng		**X**	**X**
3	**Tính thích ứng linh hoạt**	Chuyển đổi công năng linh hoạt, mở rộng không gian có kiểm soát	Đáp ứng nhu cầu sống hiện đại	Burra (1979), HUL (2011)	Khuyến khích cấu trúc linh hoạt, vật liệu tháo lắp có tính đảo ngược	x	**X**	**X**
4	**Tính kế thừa và phát huy**	Kế thừa nguyên tắc không gian, vật liệu, tinh thần kiến trúc truyền thống Huế	Duy trì bản sắc và sáng tạo đương đại	HUL (2011), ICOMOS (2010)	Tái diễn giải kiến trúc truyền thống	**X**		

- *Quan điểm 2:* Mối quan hệ giữa tính truyền thống và tính hiện đại trong KTNO tại khu vực Kinh thành dựa trên nguyên tắc: càng gần lõi di sản thì biểu hiện của tính truyền thống càng rõ nét hơn tính hiện đại và ngược lại, càng xa lõi di sản, tính truyền thống sẽ biểu hiện thấp hơn tính hiện đại.

Như vậy, với hai quan điểm nêu trên, kết hợp Bảng 1 (Phân nhóm đặc điểm kiến trúc truyền thống Huế theo các hệ tham chiếu), nghiên cứu đề xuất chọn lọc khai thác các đặc điểm này cho từng khu vực như sau (Bảng 4):

- **Khu vực I** (tiếp cận trực tiếp và liền kề lõi di sản): áp dụng đầy đủ 14 đặc điểm thuộc Nhóm quan trọng và Nhóm ít quan trọng để tăng cường khả năng thích ứng với di sản.

- **Khu vực II** (vùng đệm): áp dụng 07 đặc điểm thuộc Nhóm quan trọng để nhận diện tính truyền thống, nhưng mở rộng khả năng tham dự của các yếu tố hiện đại.

- **Khu vực III** (vùng cảnh quan sông hồ): ngoài việc áp dụng 07 đặc điểm giống Khu vực II, thì bổ sung thêm 02 đặc điểm nữa là *khoảng lùi và cảnh quan sân vườn,* do yếu tố cảnh quan đặc thù của khu vực này.

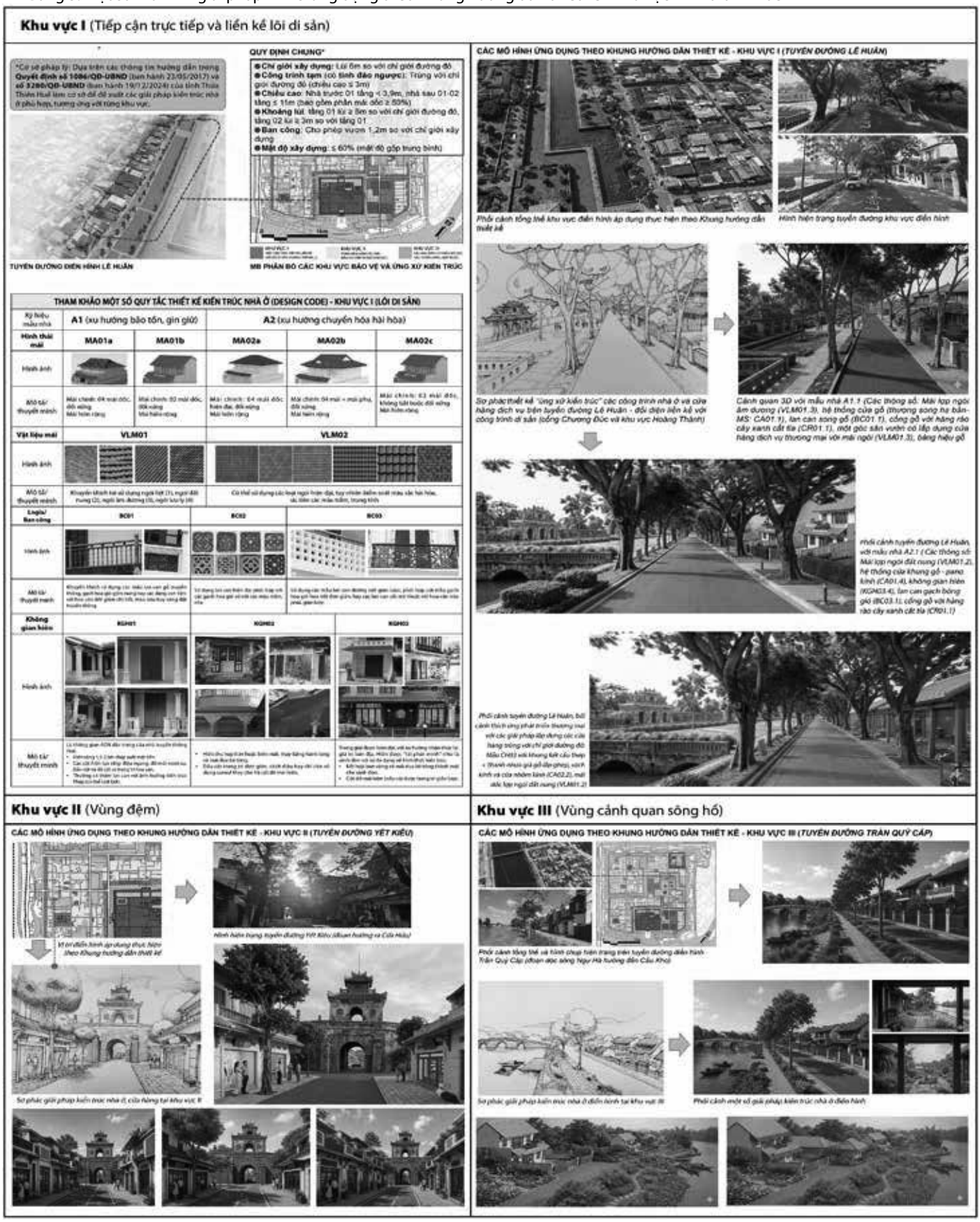
Bảng 4. Chọn lọc khai thác đặc điểm KTNO truyền thống theo ba khu vực trong Kinh thành Huế

STT	ĐẶC ĐIỂM KIẾN TRÚC TRUYỀN THỐNG		KHU VỰC I (Vùng cận lõi di sản)	KHU VỰC II (Vùng đệm)	KHU VỰC III (Vùng cảnh quan sông hồ)
1	**NHÓM QUAN TRỌNG**	Không gian hiên (15)	X	X	X
2		Vật liệu (15)	X	X	X
3		Mái (14)	X	X	X
4		Hình khối (13)	X	X	X
5		Tỷ lệ (13)	X	X	X
6		Chiều cao (12)	X	X	X
7		Hệ thống cửa (10)	X	X	X
8	**NHÓM ÍT QUAN TRỌNG**	Trang trí truyền thống (09)	X		
9		Khoảng lùi (09)	X		X
10		Nhịp điệu tuyến phố (08)	X		
11		Cảnh quan sân vườn (08)	X		X
12		Bảng hiệu (07)	X		
13		Màu sắc đặc trưng (07)	X		
14		Logia/ban công (04)	X		

4.3. Khung hướng dẫn thiết kế (Design Code)

Căn cứ theo phân vùng ứng xử kiến trúc (mục 4.1), kết hợp quan điểm phát triển KTNO và kết quả chọn lọc khai thác (mục 4.2), nghiên cứu đã đề xuất các Khung hướng dẫn thiết kế theo ba khu vực đặc trưng trong Kinh thành Huế. Từ đó, tiếp tục đề xuất những giải pháp kiến trúc nhà ở cụ thể cho từng khu vực trong Kinh thành. Tham khảo một số mô hình sau khi được ứng dụng Khung hướng dẫn thiết kế: (Bảng 5)

Bảng 5. Một số mô hình giải pháp KTNO ứng dụng theo Khung hướng dẫn thiết kế - Khu vực Kinh thành Huế



5. KẾT LUẬN

Trong bối cảnh TP Huế đang định hướng phát triển trở thành Đô thị Di sản đặc trưng của Việt Nam vào năm 2030 theo Quyết định số 1745/QĐ-TTg ngày 30/12/2023 của Thủ tướng Chính phủ, KTNO tại khu vực Kinh thành hiện nay cho thấy có khoảng cách đáng kể giữa chủ trương chính sách với thực tiễn phát triển đô thị. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất một hướng ứng xử kiến trúc dựa trên mức độ nhạy cảm di sản của từng khu vực. Cách tiếp cận này cho phép chuyển trọng tâm từ bảo tồn sang quản lý phát triển có định hướng, trong đó các giá trị truyền thống được chọn lọc, diễn giải và thích ứng thay vì áp đặt mô hình đồng nhất cho toàn bộ khu vực. Hệ thống giải pháp KTNO được cụ thể hóa thông qua Khung hướng dẫn thiết kế (Design Code) là một đóng góp quan trọng của nghiên cứu. Kết quả này khẳng định nghiên cứu không chỉ dừng lại ở bình diện học thuật mà có thể chuyển hóa thành giải pháp thực tiễn, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và thúc đẩy phát triển bền vững đô thị di sản Huế.

Tuy nhiên, việc xây dựng hệ thống tiêu chí cho Khung hướng dẫn thiết kế cần tiếp tục được nghiên cứu và hoàn thiện, đặc biệt đối với từng phân khu, các yếu tố kiến trúc đặc thù cần phải được kiểm soát chi tiết và định lượng rõ ràng hơn theo yêu cầu thiết kế. Đây có thể được xem là nền tảng ban đầu để phát triển phần mềm hỗ trợ quản lý, thiết kế và tự đánh giá cho nhà quản lý, kiến trúc sư và cộng đồng cư dân.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phan Thuận An. Huế - Di tích và con người. NXB. Khoa học Xã hội, Huế, 1992.

[2] Võ Sỹ Châu, Lê Văn Thanh Hùng. Kiến trúc đặc trưng khu phố cổ Chi Lăng - Gia Hội ở TP Huế. Tập san Nghiên cứu văn hóa miền Trung 2022 (Chuyên đề Di sản kiến trúc truyền thống), NXB. Đại học Huế, tr.117-126, 2022.

[3] Nguyễn Hữu Thông. Nghiên cứu và bảo tồn hợp lý nhà vườn truyền thống Huế. Trường Đại học Khoa học Huế, Đề tài Nghiên cứu khoa học, 2001.

[4] Nguyễn Ngọc Tùng. Di sản nhà vườn truyền thống Huế trong bối cảnh hiện tại và giải pháp bảo tồn thích ứng. Tạp chí Kiến trúc, 2024.

[5] Hiến chương Burra. Hội đồng quốc tế các Di tích Di chỉ, Úc, 1979.

[6] Hiến chương Venice. Hiến chương Quốc tế về Bảo tồn và Trùng tu Di tích và Di chỉ, Ý, 1964.

[7] ICOMOS. Hiến chương về di sản xây cất bản xứ. Đại hội đồng ICOMOS lần thứ 12 tổ chức tại Mêxicô, 1999.

[8] ICOMOS. Tuyên ngôn Xi'an. Đại hội đồng ICOMOS lần thứ 15 tổ chức tại thành phố Xi'an, Trung Quốc, 2005.

[9] UBND tỉnh Quảng Nam. Quyết định số 777/QĐ-UBND ban hành Quy chế quản lý quy hoạch và kiến trúc đô thị TP Hội An, tỉnh Quảng Nam, 2016.

[10] UBND tỉnh Thừa Thiên Huế. Quyết định số 1086/QĐ-UBND ban hành ngày 25/05/2017 về việc điều chỉnh, bổ sung một số nội dung của Điều lệ (Quy định) quản lý xây dựng theo đồ án Quy hoạch chi tiết Khu Kinh thành Huế, TP Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế, 2017.

[11] UBND tỉnh Thừa Thiên Huế. Quyết định số 3280/QĐ-UBND ban hành ngày 19/12/2024 về việc phê duyệt quy hoạch phân khu (tỷ lệ 1/2000) khu vực Kinh thành Huế, TP Huế, tỉnh Thừa Thiên Huế, 2024.

[12] UNESCO. Khuyến nghị về Cảnh quan đô thị lịch sử (Historic Urban Landscape -HUL), Paris, 2011.

[13] Bręczewska-Kulesza, D. Historic residential architecture as part of urban heritage, Sustainability, Basel: MDPI, 2020.

[14] Doshi, Balkrishna V. Paths Uncharted. Ahmedabad: Mapin Publishing Pvt. Ltd., 2019.

[15] Dal Co, Francesco. Tadao Ando: Complete Works. London: Phaidon Press, 1996.

[16] Shu, Wang. Acceptance Speech. Pritzker Architecture Prize. Chicago: The Hyatt Foundation, 2012.

[17] Fromonot, Françoise. Glenn Murcutt: Works and Projects, London: Thames & Hudson, 1995.

[18] ICOMOS. New Design in Historic Settings, Paris, 2010.

[19] Tung N.N. Transformation of Hue Traditional Garden Houses in Hue Citadel Area, Vietnam, Master of Architecture (M.Arch.). The Graduate School Chiang Mai University, 2007.

[20] UNESCO. Complex of Hué Monuments, Hue, Vietnam, 1993.

[21] UNESCO. Safeguarding and Preservation Plan (PSMV) for Luang Prabang, Lao, 1999.

■Ngày nhận bài: 05/10/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/10/2026

Phương pháp xác định giao tuyến mái dạng đa giác phẳng - nghiêng đều và đề xuất ứng dụng trong giảng dạy kiến trúc

A method for determining the intersection lines of uniformly pitched roofs with planar polygonal faces and a proposed application in architectural education

> THS.KTS NGUYỄN HỮU LỘC
Bộ môn Khoa học Ứng dụng, Khoa Khoa học Cơ bản, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
Email: loc.nguyenhuu@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Bài toán xác định hệ giao tuyến mái có các diện mái là đa giác phẳng và cùng độ dốc thường được tài liệu kỹ thuật trình bày như một quy trình dựng hình cho một phương án duy nhất, trong khi lý thuyết khung thẳng (straight skeleton) của hình học tính toán đã chỉ ra rằng trên cùng một chu vi, mái nghiêng đều nói chung có nhiều nghiệm. Bài báo đề xuất một phương pháp dựng hình theo Hình học họa hình, gồm: quy trình dựng tay năm bước dựa trên bốn quy luật hình thành giao tuyến; phương pháp chia nhỏ mặt bằng cho các chu vi phức tạp; cách chuyển một nghiệm thường thành nghiệm tới hạn (mái dựng theo khung thẳng) bằng mở rộng mặt phẳng mái (minh họa bằng ví dụ); và cách dựng mặt đứng từ mặt bằng giao tuyến theo thứ tự cao độ các điểm nút. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất chuỗi bài tập và tiêu chí chấm cho học phần Hình học họa hình ngành kiến trúc.

Từ khóa: Giao tuyến mái; mái nghiêng đều; khung thẳng; Hình học họa hình; hình chiếu thẳng góc.

ABSTRACT

Roof intersection problems for uniformly pitched roofs with planar polygonal faces are usually presented in technical literature as a construction procedure yielding a single solution, whereas the straight skeleton theory of computational geometry shows that such roofs over a given outline are generally not unique. This paper proposes a descriptive-geometry procedure comprising a five-step manual construction based on four rules of intersection-line formation, a plan subdivision method for complex outlines, the transformation of an ordinary solution into the critical solution (the straight-skeleton roof) by extending roof planes (illustrated by examples), and the construction of the elevation from the roof plan according to the height order of the roof nodes. A sequence of exercises with assessment criteria is proposed for teaching descriptive geometry to architecture students.

Keywords: Roof intersection; uniformly pitched roof; straight skeleton; descriptive geometry; orthographic projection.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mái dốc có các diện mái dạng đa giác phẳng được sử dụng khá phổ biến trong nhiều thể loại công trình. Từ một mặt bằng chu vi mái cho trước, kiến trúc sư phải tìm ra hệ giao tuyến - gồm giao tuyến nghiêng (hip, valley) và giao tuyến nằm ngang (ridge) - rồi mới dựng được bộ hình chiếu của mái. Các tài liệu kỹ thuật hiện nay [1, 2] chủ yếu mới dừng lại ở việc trình bày quy trình dựng hình cho một phương án khả dĩ. Vậy với cùng một chu vi mái, có thể có nhiều cách tổ chức giao tuyến khác nhau hay không?

Trong lĩnh vực hình học tính toán, Aichholzer và cộng sự [3] đã định nghĩa khung thẳng (straight skeleton) của một đa giác như sau: hãy tưởng tượng mọi cạnh của đa giác cùng dịch chuyển song song vào phía trong với cùng một tốc độ, khi đó các đỉnh sẽ chạy theo các đường phân giác và vạch nên một hệ đoạn thẳng - đó chính là khung thẳng. Nhóm tác giả chỉ ra rằng với độ dốc cho trước, mái dựng trên một chu vi nói chung không duy nhất; trong đó mái dựng theo khung thẳng là phương án duy nhất mà nước mưa rơi trên mỗi diện mái đều chảy về đúng đường chân mái của diện đó. Khái niệm này sau đó được mở rộng cho các hình đa giác tổng quát [4]. Theo [5], cách dựng mái bằng đường phân giác đã có trong các giáo trình thế kỷ XIX, nhưng chưa đề cập tính đa nghiệm.

Tuy nhiên, các kết quả trên được trình bày dưới dạng định lý và thuật toán máy tính, còn trong các tài liệu kỹ thuật đã khảo sát [1, 2], phép dựng bằng đường phân giác chưa được gắn với kết quả về tính đa nghiệm. Định nghĩa khung thẳng, tính duy nhất của mái dựng theo khung thẳng và Định lý 6 là kết quả của [3]; đóng góp

của bài báo là: quy trình dựng tay năm bước; phương pháp chia nhỏ mặt bằng; tiêu chí nhận biết nghiệm tới hạn gắn với định lý về khung thẳng; phép mở rộng mặt phẳng mái để chuyển nghiệm; trình tự dựng mặt đứng; chuỗi bài tập giảng dạy. Nghiệm thường là cấu hình còn giao tuyến tụ thủy nằm giữa mái; nghiệm tới hạn (trường hợp biên) là cấu hình không còn, ứng với mái dựng theo khung thẳng (mục 2.5).

2. NỘI DUNG KHOA HỌC

2.1. Dữ liệu và phương pháp

Nghiên cứu xét các mái có diện mái là đa giác phẳng, cùng độ dốc ($i = \tan\alpha = \text{const}$) và chung cao độ chân mái; chu vi mái là một đa giác đơn, không có sân trong. Mặt phẳng chuẩn là mặt phẳng nằm ngang giả định đi qua các điểm thấp nhất của mái ($z = 0$). Dữ liệu là các mặt bằng chu vi mái do tác giả thiết lập, chọn theo mức phức tạp tăng dần (số cạnh, số góc lõm, có hay không có cạnh song song) đến chu vi 14 cạnh, 5 góc lõm (Hình 3a); mỗi quy luật được trình bày qua một ví dụ cụ thể. Phương pháp gồm: phân tích hình học các quy luật hình thành giao tuyến; dựng hình chiếu thẳng góc dựa trên quan hệ liên thuộc điểm - đường thẳng - mặt phẳng [6]; đối chiếu với lý thuyết khung thẳng [3].

2.2. Cơ sở hình học của mái đa giác phẳng - nghiêng đều

Các thành phần hình học. Dựa trên mặt phẳng chuẩn, ta định nghĩa các thành phần cơ bản của mái như sau (Hình 1) [7, 8]:

– diện mái: các đa giác phẳng giao nhau, có cùng độ dốc *i* so với mặt phẳng chuẩn;

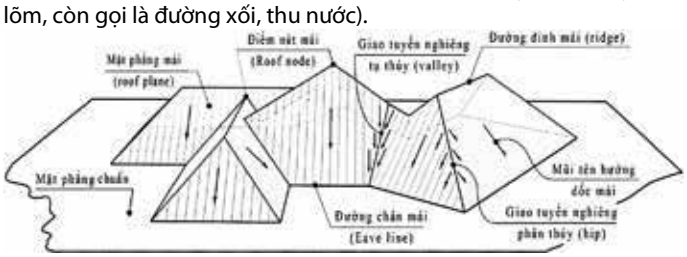
– đường chân mái (gọi tắt là chân mái): giao tuyến của diện mái với mặt phẳng chuẩn; các đường chân mái nối lại thành đường chu vi mái khép kín;

– giao tuyến nghiêng: phần giao cắt giữa hai diện mái liền kề, nghiêng một góc nhọn so với mặt phẳng chuẩn;

– giao tuyến nằm ngang: giao tuyến của hai diện mái có chân mái song song; do cùng độ dốc nên luôn nằm ngang. Nếu phân thủy thì gọi là đường đỉnh mái (ridge), nếu tụ thủy thì gọi là giao tuyến tụ thủy nằm ngang;

- điểm nút (điểm nút mái): điểm hội tụ khi có từ ba diện mái trở lên giao nhau (các điểm nằm trên đường chân mái không tính là điểm nút).

Để thể hiện hướng chảy của nước mưa, trên mỗi diện mái ta vẽ một mũi tên chỉ hướng dốc nhất, vuông góc với đường chân mái. Giao tuyến có mũi tên hai bên hướng ra xa là giao tuyến phân thủy (gờ lồi, chia nước); có mũi tên hướng vào là giao tuyến tụ thủy (gờ lõm, còn gọi là đường xối, thu nước).



Hình 1. Các thành phần hình học của mái *(Nguồn: Tác giả)*

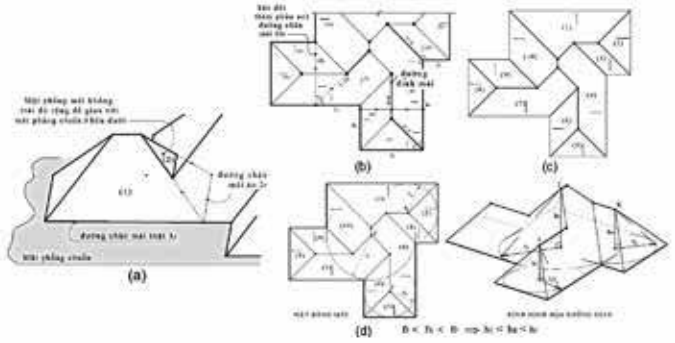
Bốn quy luật hình thành giao tuyến (Hình 2). Để tiện trình bày, ta quy ước: đường chân mái của diện mái (X) ký hiệu là X_0; giao tuyến của hai diện mái (X) và (Y) ký hiệu là X-Y.

Quy luật 1. Mỗi diện mái luôn có một đường chân mái tương ứng, thật hoặc ảo. Trong một số trường hợp, có những phần mái nằm trên cao, không trải đủ rộng xuống tới mặt phẳng chuẩn; khi đó ta tưởng tượng kéo dài diện mái này xuống cho đến khi gặp mặt phẳng chuẩn để xác định một đường chân mái ảo (Hình 2a). Chân mái ảo luôn nằm trên đường kéo dài của một cạnh chu vi. Theo [3], một cạnh chu vi có thể sinh nhiều diện mái (kể cả diện không chạm chu vi); khi đó đánh số riêng từng diện, mỗi diện một chân mái.

Quy luật 2. Trên mặt bằng, giao tuyến của hai diện mái là đường phân giác của góc tạo bởi hai đường chân mái tương ứng; góc được chọn là góc chứa các mũi tên độ dốc, tức là góc nằm về phía phần mái của cả hai diện. Ví dụ, xét hai diện mái (4) và (5) ở Hình 2b: do hai mái cùng độ dốc nên giao tuyến 4 - 5 chính là đường phân giác của góc tạo bởi hai chân mái 4_0 và 5_0. Nếu chân mái thật không đủ dài, ta kéo dài nó hoặc dùng chân mái ảo, như trường hợp giao tuyến 7 - 10. Khi hai chân mái song song, giao tuyến nằm ngang, song song và cách đều hai chân mái, như đường 4 - 6. Quy luật này phù hợp với mô hình mái của Aichholzer và cộng sự [3].

Quy luật 3. Trên mặt bằng, mỗi điểm nút là nơi hội tụ của ít nhất ba giao tuyến. Các điểm nút nối với nhau bằng giao tuyến nghiêng hoặc giao tuyến nằm ngang, tạo thành một mạng lưới chia mái thành từng diện; giải bài toán giao mái thực chất là đi tìm mạng lưới này. Mạng lưới có cấu hình hoàn chỉnh khi nó phân hoạch hết các diện mái - tức là mỗi diện mái đều được bao kín bởi đường chân mái và các giao tuyến - và mỗi diện mái chỉ có đúng một đường chân mái (Hình 2c). Lưu ý không nối tùy tiện hai điểm nút gần nhau: hai điểm nút chỉ được nối khi đoạn nối trùng với giao tuyến của hai diện mái.

Quy luật 4. Để so sánh cao độ các điểm nút, ta vẽ trên mặt bằng các đường tròn có tâm tại điểm nút và tiếp xúc với đường chân mái của một diện mái đi qua điểm nút đó. Đường tròn nào có bán kính lớn hơn thì điểm nút tương ứng cao hơn (Hình 2d). Lý do là trong không gian, bán kính r và cao độ h của điểm nút là hai cạnh góc vuông của một tam giác vuông có cạnh huyền nghiêng so với cạnh r một góc bằng góc dốc mái α, nên $h = r \cdot \tan\alpha$ (cách nâng điểm nút này cũng được [3] dùng trong chứng minh Định lý 3). Ở Hình 2d, ta có $r_I < r_K < r_J$ nên $h_I < h_K < h_J$.



Hình 2. Bốn quy luật hình thành giao tuyến mái: (a) chân mái thật và ảo; (b) giao tuyến là đường phân giác; (c) cấu hình hoàn chỉnh; (d) so sánh cao độ các điểm nút bằng bán kính đường tròn ; X0 - chân mái của diện (X); X-Y - giao tuyến của (X), (Y); r - bán kính; h - cao độ *(Nguồn: Tác giả)*

2.3. Quy trình dựng tay năm bước

Xét một mặt bằng chu vi mái cho trước như Hình 3a. Ta thực hiện việc tìm hệ giao tuyến theo năm bước sau:

Bước 1. Đặt tên cho tất cả các diện mái theo số thứ tự của các đường chân mái trên chu vi. Trên mỗi diện mái vẽ một mũi tên chỉ độ dốc, vuông góc với đường chân mái tương ứng (Hình 3b).

Bước 2. Lần lượt dựng giao tuyến nghiêng của các cặp diện mái có chân mái liền kề nhau trên chu vi. Một thủ thuật hữu ích là vẽ các đường song song cách đều chu vi mái: giao điểm của chúng giúp xác định nhanh và chính xác các đường phân giác (Hình 3c).

Bước 3. Tìm các "nhánh" mái có dạng chữ nhật (nếu có). Trên mỗi nhánh, dựng giao tuyến nằm ngang của cặp diện mái đối diện - có chân mái song song - rồi nối với các giao tuyến nghiêng ở đầu nhánh để hình thành các điểm nút (Hình 3d).

Bước 4. Kéo dài từng cặp gồm một giao tuyến nằm ngang và giao tuyến nghiêng gần nó nhất cho đến khi chúng gặp nhau, tạo thành các điểm nút (chưa hoàn thiện). Khi kéo dài, các đoạn này không được cắt nhau hay chồng lên nhau (Hình 3e).

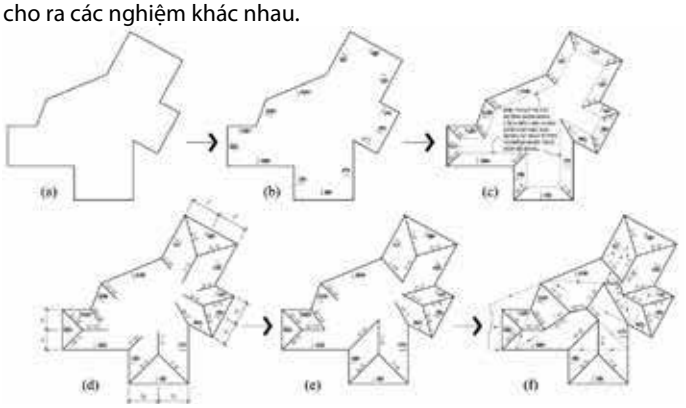
Bước 5. Tiếp tục ghép cặp các diện mái gần nhau mà chưa được phân hoạch, tìm giao tuyến của chúng theo quy luật 2. Quá trình đi dần từ chu vi vào trong, cho đến khi mọi diện mái đều được phân hoạch và mạng lưới đạt cấu hình hoàn chỉnh (Hình 3f).

Quy trình chỉ cần hai thao tác cơ bản là dựng đường phân giác và dựng đường song song, nên áp dụng được cho cả bản vẽ tay lẫn bản vẽ CAD; kết quả được kiểm tra bằng quy luật 3 và bằng điều kiện: mỗi điểm nút phải cách đều đường chân mái (thật hoặc kéo dài) của mọi diện mái quanh nó.

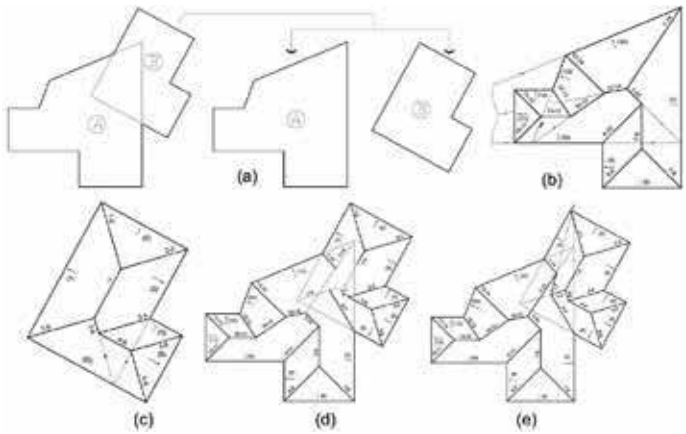
2.4. Phương pháp chia nhỏ mặt bằng

Giải trực tiếp cho cả mặt bằng lớn là khả thi nhưng khá phức tạp khi chu vi có nhiều đường chân mái. Để đơn giản hóa, ta có thể chia mặt bằng thành n vùng mái nhỏ, chồng lấn một phần lên nhau, rồi giải n bài toán nhỏ một cách độc lập theo quy trình ở mục 2.3. Sau đó, ta ghép các mái nhỏ trở lại mặt bằng chính, tìm các đoạn giao tuyến còn thiếu giữa các mái nhỏ và loại bỏ những phần mái thừa.

Áp dụng cho chu vi ở Hình 3a, ta chia mặt bằng thành hai vùng A và B (Hình 4a), giải riêng vùng A (Hình 4b) và vùng B (Hình 4c), rồi ghép lại và hoàn thiện (Hình 4d, 4e); Hình 3 và Hình 4 dùng chung cách đánh số diện mái. Điều đáng chú ý là cấu hình nhận được (Hình 4e) khác với cấu hình giải trực tiếp (Hình 3f), dù cùng một chu vi mái: theo cách phân loại ở mục 2.5, Hình 3f là nghiệm tới hạn, còn Hình 4e là nghiệm thường. Như vậy, cách chia mặt bằng khác nhau có thể cho ra các nghiệm khác nhau.



Hình 3. Quy trình dựng tay: (a) chu vi mái cho trước; (b)–(f) bước 1 đến bước 5 *(Nguồn: Tác giả)*



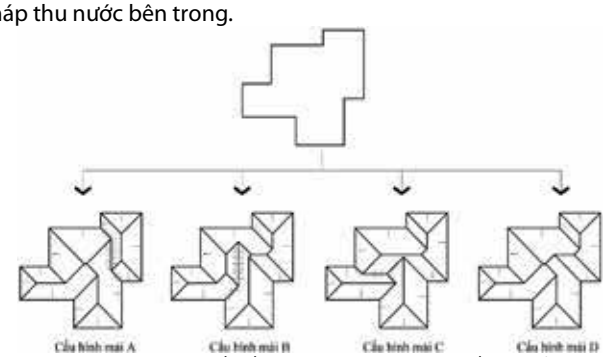
Hình 4. Chia nhỏ mặt bằng: (a) chia thành vùng A và B; (b) giải vùng A; (c) giải vùng B; (d) ghép và dựng giao tuyến còn thiếu; (e) cấu hình hoàn *chỉnh (Nguồn: Tác giả)*

2.5. Nghiệm thường, nghiệm tới hạn và cách chuyển đổi

Phân loại nghiệm. Để nghiên cứu mối liên hệ giữa các cấu hình khác nhau của cùng một chu vi mái, ta chú ý đến các giao tuyến tụ thủy. Ở mọi cấu hình, tại mỗi góc lõm của chu vi luôn có một giao tuyến tụ thủy xuất phát. Tuy nhiên, có những cấu hình còn chứa giao tuyến tụ thủy nối giữa hai điểm nút nằm bên trong mái, không chạm tới chu vi - tức là những giao tuyến tụ thủy nằm giữa mái. Từ đó, tác giả phân loại: mỗi cấu hình hoàn chỉnh là một nghiệm của bài toán, gọi là nghiệm thường nếu có ít nhất một giao tuyến tụ thủy (kể cả giao tuyến tụ thủy nằm ngang) nối hai điểm nút; và gọi là nghiệm tới hạn nếu mọi giao tuyến tụ thủy đều có một đầu nằm trên chu vi mái. Nhóm các giao tuyến tụ thủy nối với nhau ở giữa mái được gọi là cụm giao tuyến tụ thủy. Xét chu vi mái ở Hình 5: các cấu hình A, B, C là nghiệm thường vì còn chứa một cụm giao tuyến tụ thủy, còn cấu hình D là nghiệm tới hạn.

Trên bản vẽ, cách nhận biết khá đơn giản: xét hai đầu của từng giao tuyến tụ thủy. Chỉ cần một giao tuyến có cả hai đầu là điểm nút nằm trong mái thì cấu hình là nghiệm thường; nếu giao tuyến tụ thủy nào cũng có một đầu tựa trên chu vi, tức là tại một góc lõm, thì cấu hình là nghiệm tới hạn. Theo [3], chu vi được giả thiết không suy biến (mỗi điểm nút có đúng ba giao tuyến); mặt bằng trực giao hay đối xứng thường có điểm nút từ bốn giao tuyến (như đỉnh mái hông trên mặt bằng vuông), nên các kết quả này chưa bao quát các trường hợp đó.

Theo Định lý 6 của Aichholzer và cộng sự [3], một mái nghiêng đều trùng với mái dựng theo khung thẳng khi và chỉ khi mọi giao tuyến tụ thủy của nó đều chạm chu vi mái. Như vậy, với cách phân loại trên, nghiệm tới hạn chính là mái dựng theo khung thẳng; mái này (với đa giác đơn) luôn tồn tại và là duy nhất, nên mỗi chu vi mái có thể có nhiều nghiệm thường nhưng chỉ có một nghiệm tới hạn. Kết quả trong [3] được chứng minh cho độ dốc 45°; với độ dốc chung bất kỳ, mái chỉ co giãn theo phương đứng, hình chiếu bằng không đổi nên kết quả vẫn đúng. Về mặt kiến trúc, theo Định lý 7 của [3], chỉ ở nghiệm tới hạn nước mưa trên mỗi diện mái mới chảy theo đường dốc nhất đến đúng đường chân mái của diện đó (có thể đi dọc giao tuyến tụ thủy); ở nghiệm thường có thể có điểm đọng nước giữa mái (điểm thấp nhất của giao tuyến tụ thủy), nên cần giải pháp thu nước bên trong.



Hình 5. Một chu vi mái với bốn cấu hình nghiệm A, B, C, D *(Nguồn: Tác giả)*

Chuyển nghiệm thường thành nghiệm tới hạn. Ý tưởng là "lấp" cụm giao tuyến tụ thủy bằng cách cho các mặt phẳng mái xung quanh nó phát triển lên cao, giao nhau và che phủ cụm tụ thủy bên dưới. Xét cấu hình A (Hình 6):

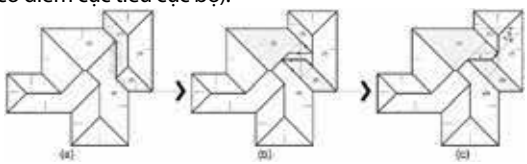
– các diện mái (3) và (4) là hai mặt cơ sở, giao nhau tạo thành giao tuyến tụ thủy chính của cụm (Hình 6a);

– phát triển hai diện mái (1) và (2) lên phía trên bằng cách kéo dài các giao tuyến của chúng, che lấp một phần vùng tụ thủy (Hình 6b);

– tiếp tục phát triển các diện mái (1) và (5) lên phía trên bằng cách dựng giao tuyến nghiêng 1-5;

– các diện mái (1), (2) và (5) sau khi phát triển lên cao sẽ giao nhau tại đỉnh a, che lấp hoàn toàn cụm tụ thủy bên dưới (Hình 6c).

Sau khi cụm tụ thủy được che lấp, cấu hình A đã biến đổi thành cấu hình D. Thực hiện tương tự (không trình bày hình), các cấu hình B và C cũng biến đổi về cấu hình D. Trong các ví dụ đã xét, phép mở rộng mặt phẳng mái luôn đưa nghiệm thường về nghiệm tới hạn; việc chứng minh điều này cho trường hợp tổng quát là hướng nghiên cứu tiếp theo. Trong ví dụ này nghiệm tới hạn có đỉnh mái cao nhất, nhưng theo [3] đây không phải là tính chất tổng quát. Mái dựng theo khung thẳng còn được khảo sát như một cấu trúc dựng mái trong [9]; với chu vi trực giao, Ahn và cộng sự [10] chứng minh rằng mái này có chiều cao và thể tích lớn nhất trong các "mái thực tế" (không có diện mái tách rời chu vi, không có điểm cực tiểu cục bộ).



Hình 6. Chuyển cấu hình A (nghiệm thường) thành cấu hình D (nghiệm tới hạn) bằng cách mở rộng mặt phẳng mái: (a) cấu hình A và cụm tụ thủy; (b) phát triển các diện mái (1) và (2); (c) giao tuyến 1–5 và đỉnh a, nhận được cấu hình D *(Nguồn: Tác giả)*

2.6. Dựng mặt đứng

Sau khi đã có một cấu hình mặt bằng hoàn chỉnh, ta tiếp tục dựng mặt đứng của mái dựa vào quan hệ liên thuộc giữa điểm - đường thẳng - mặt phẳng [6]. Ý tưởng chính là dựng từ trên cao xuống: bắt đầu từ điểm cao nhất rồi hạ dần từng bậc cao độ. Trình tự như sau (Hình 7):

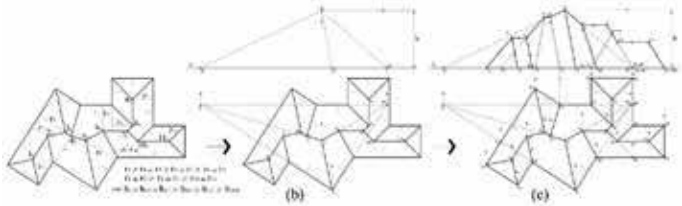
– so sánh cao độ các điểm nút và giao tuyến nằm ngang theo quy luật 4 để tìm vị trí cao nhất h_{max} (Hình 7a). Ở ví dụ này: $h_5 > h_3 = h_4 > h_6 = h_7 > h_8 = h_9 > h_1 = h_2 > h_{10} = h_{11}$;

– với $h_{max} = r_5 \cdot \tan\alpha$ (tức là khi cho trước độ dốc mái), dựng hình chiếu đứng các giao tuyến nghiêng nối từ các điểm trên mặt phẳng chuẩn lên điểm nút cao nhất (Hình 7b);

– từ các giao tuyến vừa dựng, dóng liên thuộc để tìm hình chiếu đứng của các điểm nút và giao tuyến nằm ngang ở bậc cao độ thấp hơn kế tiếp, rồi dựng tiếp các giao tuyến nghiêng của chúng;

– lặp lại quá trình, hạ dần từng bậc cao độ cho đến khi hoàn thiện; cuối cùng phân biệt nét thấy, nét khuất và vẽ đường chân mái (Hình 7c).

Như vậy chỉ cần biết một giá trị h_{max}; các cao độ còn lại được xác định bằng dóng liên thuộc.



Hình 7. Dựng mặt đứng: (a) xếp thứ tự cao độ điểm nút; (b) dựng các giao tuyến nghiêng của điểm nút cao nhất; (c) bộ hình chiếu hoàn chỉnh *(Nguồn: Tác giả)*

2.7. Đề xuất ứng dụng trong giảng dạy

Tác giả đề xuất đưa nội dung bài báo vào học phần Hình học họa hình dưới dạng chuỗi bài tập tăng dần độ khó (Bảng 1). Đối tượng dự kiến là sinh viên năm thứ nhất, học kỳ 1 và 2 (tùy ngành đào tạo).

Tiêu chí chấm dựa trên chính các quy luật hình học nên có thể kiểm tra khách quan: (i) nhận diện đúng thành phần mái và loại giao tuyến; (ii) giao tuyến nằm đúng trên đường phân giác, giao tuyến nằm ngang cách đều hai chân mái; (iii) cấu hình hoàn chỉnh theo quy luật 3 (mỗi diện mái một chân mái, mỗi điểm nút từ ba giao tuyến, cách đều các chân mái quanh nó); (iv) phân loại đúng nghiệm thường và nghiệm tới hạn; (v) thứ tự cao độ và quan hệ liên thuộc giữa hai hình chiếu đúng; (vi) phân biệt nét thấy, nét khuất. Hiệu quả của chuỗi bài tập sẽ được đánh giá trong nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 1. Chuỗi bài tập đề xuất cho học phần Hình học họa hình *(Nguồn: Tác giả)*

Bài tập	Nội dung	Mục	Tiêu chí chấm
BT1	Nhận diện thành phần mái, giao tuyến phân thủy – tụ thủy trên phối cảnh và mặt bằng	2.2	(i)
BT2	Dựng hệ giao tuyến cho chu vi đơn giản (6–8 cạnh) theo năm bước	2.3	(ii), (iii)
BT3	Chu vi phức tạp (từ 12 cạnh): giải trực tiếp và chia nhỏ, so sánh hai kết quả	2.3, 2.4	(ii), (iii)
BT4	Tìm ít nhất hai nghiệm cho một chu vi; chuyển nghiệm thường thành nghiệm tới hạn	2.5	(iii), (iv)
BT5	Dựng mặt đứng từ mặt bằng giao tuyến	2.6	(v), (vi)

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã hệ thống hóa bài toán giao tuyến mái đa giác phẳng - nghiêng đều theo hướng dựng hình của Hình học họa hình, đối chiếu với lý thuyết khung thẳng của hình học tính toán, và đề xuất cách đưa nội dung này vào giảng dạy.

Việc nhận ra một chu vi mái có thể có nhiều nghiệm giúp người thiết kế cân nhắc các cấu hình khác nhau. Đối chiếu với lý thuyết khung thẳng cho thấy phương pháp dựng tay phù hợp với kết quả của hình học tính toán trong các ví dụ đã khảo sát.

Các kết quả hiện được minh họa qua một số ví dụ; cần kiểm chứng trên tập chu vi mái đa dạng hơn, chẳng hạn đối chiếu với kết quả của chương trình dựng khung thẳng tự động. Phần ứng dụng giảng dạy mới ở mức đề xuất, chưa có dữ liệu thực nghiệm nên bài báo không nhận định về hiệu quả; bước tiếp theo là thử nghiệm chuỗi bài tập với sinh viên.

Nghiên cứu giới hạn ở mái cùng độ dốc và chung cao độ chân mái; chứng minh tổng quát phép chuyển nghiệm và mở rộng cho mái có độ dốc khác nhau hoặc chân mái lệch cao độ là các hướng nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vũ Tiến Đạt. Phương pháp vẽ hình học mái nhà và CAD, Hà Nội. NXB. Xây dựng, 2023.

[2] N. R. Bakhoum and O. A. Wakita. The Professional Practice of Architectural Working Drawings, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2023.

[3] O. Aichholzer, F. Aurenhammer, D. Alberts and B. Gärtner. A novel type of skeleton for polygons. J. Universal Comput. Sci., vol. 1, no. 12, pp. 752-761, 1995, doi: 10.3217/jucs-001-12-0752.

[4] O. Aichholzer and F. Aurenhammer. Straight skeletons for general polygonal figures. in Proc. 2nd Annu. Int. Conf. Computing and Combinatorics (COCOON'96), ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1090, Hong Kong, pp. 117-126, 1996.

[5] O. Aichholzer et al. What makes a tree a straight skeleton?. in Proc. 24th Canadian Conf. Computational Geometry (CCCG 2012), Charlottetown, PE, Canada, pp. 253-258, 2012.

[6] Nguyễn Đình Điện và Đỗ Mạnh Môn. Hình học họa hình - tập 1, Hà Nội, Việt Nam: NXB. Giáo dục, 2012.

[7] F. D. K. Ching, Building Construction Illustrated, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014.

[8] Nguyễn Đức Thiềm, Nguyễn Mạnh Thu và Trần Bút. Cấu tạo kiến trúc nhà dân dụng. Hà Nội, Việt Nam. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2007.

[9] D. Eppstein and J. Erickson. Raising roofs, crashing cycles, and playing pool: Applications of a data structure for finding pairwise interactions. Discrete Comput. Geom., vol. 22, no. 4, pp. 569-592, 1999.

[10] H.-K. Ahn, S. W. Bae, C. Knauer, M. Lee, C.-S. Shin and A. Vigneron. Realistic roofs over a rectilinear polygon. Comput. Geom., vol. 46, no. 9, pp. 1042-1055, 2013, doi: 10.1016/j.comgeo.2013.06.002.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/10/2026

Nhận diện hệ thống di sản kiến trúc đô thị tại Cực phát triển Quy Nhơn (Hành lang liên kết tổng hợp Đông Tây) tỉnh Gia Lai

Identifying the urban architectural heritage system of the Quy Nhon growth node the (Integrated East-West development corridor), Gia Lai province

> PHAN THỊ DIỆU HẰNG[1,*], LÊ QUÂN[2], NGUYỄN THỊ HẠNH NGUYÊN[3]
[1]Trường Đại học Quy Nhơn
[2]Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[3]Trường Đại học Văn Lang
[*]Email: phanthidieuhang@qnu.edu.vn

TÓM TẮT

Cực phát triển Quy Nhơn (Hành lang liên kết tổng hợp Đông Tây) tỉnh Gia Lai (địa bàn tỉnh Bình Định cũ) tích lũy gần một nghìn năm lịch sử đô thị nhưng chưa từng được nhận diện hệ thống như một chỉnh thể di sản. Bài báo trình bày kết quả nhận diện hệ thống di sản kiến trúc đô thị (DSKTĐT) của khu vực theo cách tiếp cận ba bộ phận (quy hoạch - cấu trúc đô thị, cảnh quan, công trình) trên bộ khung cảnh quan núi - đầm - biển, bằng tổ hợp phương pháp phân tích tư liệu lịch sử, chồng lớp bản đồ và khảo sát thực địa. Kết quả xác lập: (i) dòng hình thành di sản năm giai đoạn với quy luật "trung tâm dịch chuyển - bộ khung cảnh quan bất biến" quanh đầm Thị Nại; (ii) quỹ di sản 25 đối tượng và nhóm di sản được mã hóa thống nhất theo đơn vị hành chính mới sau sáp nhập tỉnh năm 2025; (iii) phân vùng lõi - đệm - mở rộng và khung phân loại đa trục làm cơ sở cho đánh giá giá trị và hoạch định công cụ bảo tồn theo Luật Di sản văn hóa số 45/2024/QH15.

Từ khóa: Di sản kiến trúc đô thị; nhận diện di sản; phân vùng di sản; Quy Nhơn; Gia Lai.

ABSTRACT

Quy Nhon growth node the integrated East-West development corridor of Gia Lai province (the former Binh Dinh province,) has accumulated nearly a millennium of continuous urban history, yet its heritage has never been identified as an integrated system. This paper presents the identification of the urban architectural heritage system of the zone, approached as a three-component whole (planning - urban structure, landscape, and buildings) resting on the mountain - lagoon - sea landscape framework, using a combination of historical document analysis, multi-period map overlay, and field survey. The results establish: (i) a five-period heritage formation sequence following the rule of "shifting urban center - persistent landscape frame" around Thi Nai lagoon; (ii) an inventory of 25 heritage objects and groups coded consistently under the new administrative units after the 2025 provincial merger; and (iii) a core - buffer - expansion zoning and a multi-axis classification framework as the basis for value assessment and conservation tools under the amended Law on Cultural Heritage No. 45/2024/QH15.

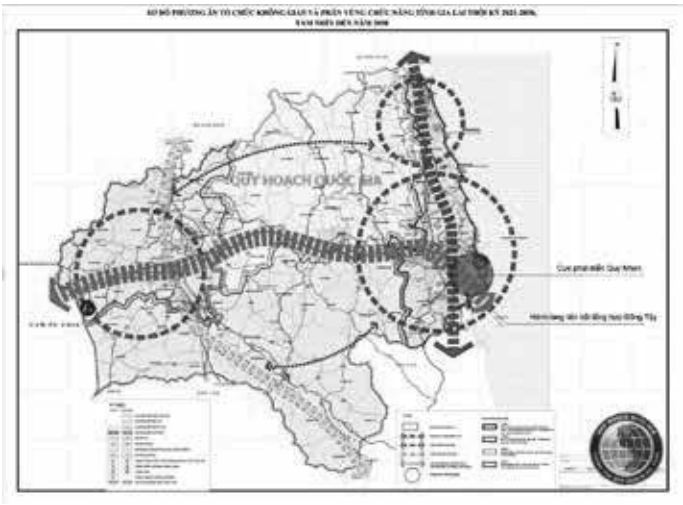
Keywords: Urban architectural heritage; heritage identification; heritage zoning; Quy Nhon; Gia Lai.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các đô thị ven biển Việt Nam đang bước vào giai đoạn đô thị hóa với tốc độ chưa từng có. Trong dòng chảy phát triển ấy, một nghịch lý lặp lại ở nhiều địa phương: chính những không gian đô thị ven biển giàu giá trị lịch sử nhất lại là nơi chịu áp lực biến đổi mạnh nhất, bởi hạ tầng sẵn có, vị trí trung tâm và giá trị cảnh quan khiến chúng vừa là động lực, vừa là nạn nhân của chính quá trình phát triển mà chúng góp phần tạo ra. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy khi bảo tồn bị xem như hoạt động bù đắp sau phát triển, kết quả thường là sự xóa nhòa từng phần của cấu trúc đô thị lịch sử và sự mai một của các lớp di sản không thể tái tạo [1].

Bối cảnh thể chế của khu vực nghiên cứu được định hình bởi hai biến cố lớn của năm 2025. Thứ nhất, theo Nghị quyết số 1664/NQ-UBTVQH15 của Ủy ban Thường vụ Quốc hội, từ ngày

01/7/2025 tỉnh Bình Định sáp nhập vào tỉnh Gia Lai; thành phố Quy Nhơn cũ được tổ chức lại thành các phường Quy Nhơn, Quy Nhơn Đông, Quy Nhơn Nam cùng các xã Nhơn Châu, và trở thành hạt nhân của khu vực động lực phát triển ven biển phía Đông của tỉnh mới [2]. Thứ hai, Luật Di sản văn hóa số 45/2024/QH15 (hiệu lực từ 01/7/2025) lần đầu tiên đưa "quần thể kiến trúc đô thị, nông thôn, địa điểm cư trú, khu vực đô thị và nông thôn" vào tiêu chí di tích kiến trúc - nghệ thuật tại Điều 21 [3]. Luật đã mở đường cho bảo tồn cấp khu vực, nhưng khoa học và thực tiễn quản lý chưa kịp đi theo: chưa có phương pháp chuẩn hóa để nhận diện, đánh giá và phân hạng các đối tượng thuộc loại hình mới này.



Hình 1. Vị trí của Cực phát triển Quy Nhơn và hành lang liên kết tổng hợp Đông Tây (theo Quy hoạch tỉnh Gia Lai thời kỳ 2021 - 2039, tầm nhìn 2050)

Về phía khu vực, áp lực phát triển đang tăng nhanh. Du lịch địa phương phục hồi mạnh sau đại dịch: từ 4,8 triệu lượt khách với doanh thu khoảng 6.000 tỷ đồng năm 2019, lên 5,0 triệu lượt khách với 16.405 tỷ đồng năm 2023, và đạt 9,2 triệu lượt khách với khoảng 25.500 tỷ đồng năm 2024 [4]. Trong khi đó, các nghiên cứu bảo tồn di sản kiến trúc đô thị ở Việt Nam đến nay chủ yếu tập trung vào những đô thị di sản đã được nhận diện sẵn (phố cổ Hà Nội, phố cổ Hội An, cố đô Huế, khu phố Pháp Hải Phòng); chưa có nghiên cứu hệ thống nào về di sản kiến trúc đô thị trong bối cảnh "khu vực động lực phát triển" - nơi di sản phân tán qua nhiều đơn vị hành chính, đa thời kỳ, phần lớn chưa được định danh và đang chịu áp lực phát triển cực lớn.

Bài báo trình bày kết quả nhận diện hệ thống di sản kiến trúc đô thị của khu vực - kết quả nghiên cứu thứ nhất của luận án tiến sĩ đang thực hiện - nhằm trả lời ba câu hỏi: hệ thống di sản của khu vực đã hình thành theo tiến trình nào; quỹ di sản hiện hữu gồm những gì và đang ở trạng thái định danh ra sao; và hệ thống đó được phân vùng, phân loại thế nào để làm cơ sở cho đánh giá giá trị và hoạch định công cụ bảo tồn.

2. CƠ SỞ VÀ PHƯƠNG PHÁP NHẬN DIỆN

2.1. Khái niệm và cách tiếp cận hệ thống

DSKTĐT được hiểu là hệ thống di sản kiến trúc tồn tại trong không gian đô thị, gồm ba bộ phận hữu cơ: di sản quy hoạch - cấu trúc đô thị (mạng lưới giao thông, cấu trúc chức năng, các trục định hình), di sản kiến trúc cảnh quan (cảnh quan tự nhiên - nhân tạo mang giá trị văn hóa gắn với đô thị) và di sản kiến trúc công trình (các công trình và cụm công trình có giá trị). Khái niệm này tương thích với quy định tại Điều 21 Luật số 45/2024/QH15 [3] và tiếp cận theo tinh thần Khuyến nghị về Cảnh quan đô thị lịch sử (HUL) của UNESCO: giá trị của hệ thống không quy giản về tổng giá trị các bộ phận mà nằm ở quan hệ giữa các bộ phận và tính liên tục của lớp lịch sử [5].

Khác với cách tiếp cận quen thuộc xem di sản như tập hợp các công trình đơn lẻ đã được xếp hạng, nghiên cứu này đọc DSKTĐT của khu vực như một chỉnh thể ba bộ phận đặt trên bộ khung cảnh quan núi - đầm - biển: dãy núi Phương Mai - Triều Châu và Ghềnh Ráng ôm lấy cửa biển, đầm Thị Nại với mặt nước khoảng 5.060 ha và vịnh Quy Nhơn hình trăng khuyết. Cách tiếp cận hệ thống này kế thừa truyền thống hình thái học đô thị của Conzen [6] và các luận án bảo tồn khu phố lịch sử ở Việt Nam [7], nhưng được điều chỉnh cho một đô thị ven biển miền Trung có di sản đa lớp, phân tán.

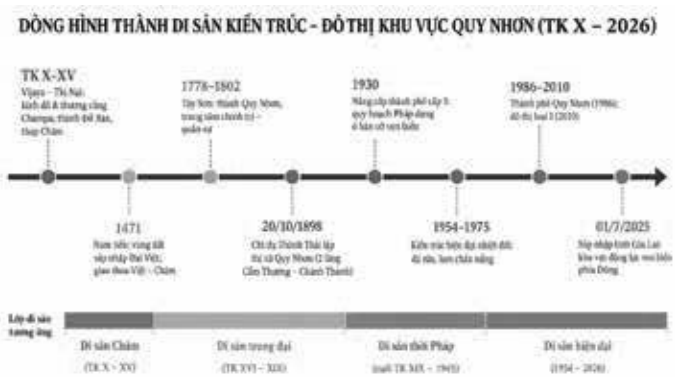
2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng tổ hợp ba phương pháp trên cùng một nền tảng dữ liệu. Một là phân tích - tổng hợp tư liệu lịch sử: bản vẽ, bản đồ, niên giám thống kê thời Pháp, các công trình sử học - khảo cổ về vùng đầm Thị Nại và đô thị Quy Nhơn [8 -12], trong đó bộ bản vẽ kiểm kê đền tháp Chăm của H. Parmentier công bố từ năm 1909 là tư liệu sơ cấp quan trọng [13]. Hai là phân tích chồng lớp bản đồ: ba lớp bản đồ tiêu biểu - bản đồ vùng Quy Nhơn thời Tự Đức (thế kỷ XIX), bản đồ quy hoạch thời Pháp (khoảng 1927 - 1930) và bản đồ năm 1969 - được chồng lớp để đọc diễn tiến hình thái đô thị và mức độ còn lại của từng lớp. Ba là khảo sát thực địa: lập hồ sơ từng đối tượng di sản, chụp ảnh hệ thống, xác lập hiện trạng và đối chiếu với tư liệu. Phạm vi không gian là sáu đơn vị hành chính cấp xã của khu vực động lực ven biển phía Đông theo địa giới mới (ba phường Quy Nhơn, Quy Nhơn Đông, Quy Nhơn Nam); phạm vi thời gian của quỹ di sản giới hạn ở các thành phần hình thành từ thế kỷ XI đến trước năm 1975.

3. DÒNG HÌNH THÀNH VÀ PHÂN LỚP DI SẢN

3.1. Năm giai đoạn hình thành và quy luật dịch chuyển trung tâm

Xét theo tiến trình tích lũy di sản, lịch sử khu vực chia thành năm giai đoạn, mỗi giai đoạn để lại một lớp di sản riêng đồng thời tiếp nối và tái định nghĩa các địa điểm của giai đoạn trước (Hình 1, Bảng 1). Trong hơn một thiên niên kỷ, trung tâm chính trị - thương mại của khu vực lần lượt đặt tại thương cảng Thị Nại của người Chăm (thế kỷ X–XV), đô thị Nước Mặn thời chúa Nguyễn, rồi thị xã Quy Nhơn được lập theo chỉ dụ ngày 20/10/1898 (Toàn quyền Doumer chuẩn y ngày 30/8/1899) và nâng lên đô thị cấp 3 năm 1930. Quy luật "trung tâm dịch chuyển - bộ khung cảnh quan bất biến" khiến quỹ di sản không tập trung tại một điểm mà trải thành vành đai quanh cửa đầm - đặc điểm cấu trúc quyết định mọi thao tác nhận diện, phân vùng và bảo tồn về sau.



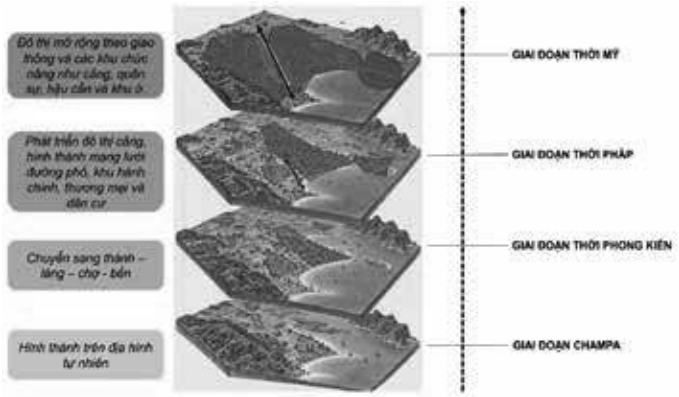
Hình 2. Dòng hình thành di sản kiến trúc - đô thị khu vực (thế kỷ X - 2026)

Bảng 1. Các giai đoạn lịch sử và lớp di sản tương ứng

Giai đoạn	Mốc/sự kiện chính	Lớp di sản tương ứng
Chăm pa (TK X - XV)	Kinh đô Vijaya - Đồ Bàn; thương cảng Thị Nại; trận thủy chiến 1282	Tháp Chăm (Bình Lâm, Bánh Ít, Tháp Đôi); dấu tích thành Thị Nại; địa danh Thị Nại
Trung đại Việt - Hoa (1471 - 1874)	Nam tiến 1471; phủ Quy Nhơn; thời Tây Sơn 1778 - 1802; tỉnh Bình Định thời Nguyễn	Đình, chùa, miếu, hội quán người Hoa; nhà lá mái Bình Định; lũy Phương Mai
Cận đại Pháp (1874 - 1954)	Chiếm Thị Nại 1885; chỉ dụ lập thị xã 20/10/1898; chuẩn y 30/8/1899; đô thị cấp 3 năm 1930	Lưới phố ô bàn cờ; công sở - nhà thờ - chủng viện phong cách Đông Dương; ga và tuyến đường sắt
1954 - 1975	Đô thị tỉnh lị; chiến tranh	Kiến trúc hiện đại nhiệt đới: đá rửa, bê tông trần, lam chắn nắng; nhà ở làng chài
1975 đến nay	Thành phố (1986); đô thị loại II (1998); đô thị loại I (2010); sáp nhập tỉnh 01/7/2025	Lớp đô thị hóa mới; một số di sản bị xóa bỏ hoặc biến dạng trong quá trình phát triển

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

Lớp di sản Chăm pa là lớp trầm tích sâu nhất, định danh văn hóa cho toàn vùng. Từ thế kỷ X đến thế kỷ XV, khu vực là trung tâm xứ Vijaya với kinh đô Đồ Bàn và thương cảng Thị Nại - một trong những hải cảng quan trọng bậc nhất của Chiêm Thành trên tuyến thương mại biển Đông [9, 10]. Trong phạm vi và vùng liên hệ của khu vực nghiên cứu còn ba cụm tháp tiêu biểu: tháp Bình Lâm (cuối thế kỷ X - đầu thế kỷ XI), quần thể tháp Bánh Ít (cuối thế kỷ XI - đầu thế kỷ XII) và tháp Đôi (cuối thế kỷ XII), theo phong cách Bình Định với tỷ lệ khối chắc khỏe, cột giả chạy dọc thân, vòm cuốn dạng mũi lao [11]. Các tháp đều đặt trên gò đồi ven đầm - ven cửa biển theo logic địa điểm quan sát mà các giai đoạn sau tiếp nối (Hình 2, Hình 3).



Hình 3. Tách lớp diễn tiến không gian khu vực qua bốn giai đoạn Champa - phong kiến - Pháp thuộc - (1954 - 1975)

Lớp trung đại Việt - Hoa (1471 - 1898) ghi dấu quá trình giao thoa Việt - Chăm - Hoa: hệ thống đình - chùa - miếu của làng xã Việt, các hội quán của cộng đồng người Hoa định cư từ thế kỷ XVII gắn với cảng thị Nước Mặn [10], và loại hình nhà lá mái Bình Định với kết cấu "trần đất, mái tranh" giải pháp sinh thái hoàn chỉnh cho khí hậu miền Trung [12]. Tiêu biểu là chùa Long Khánh khởi dựng năm 1715, còn lưu giữ bảo khánh đúc năm 1715, chuông đúc năm 1805 và dấu biển "Long Khánh Tự" ban năm 1813. Về quốc phòng, lũy cổ Phương Mai thời Minh Mệnh xây bằng kỹ thuật xếp đá khan không chất kết dính là dấu tích còn lại của hệ thống phòng thủ cửa biển Thị Nại.

3.2. Lớp di sản cận đại qua thống kê tư liệu

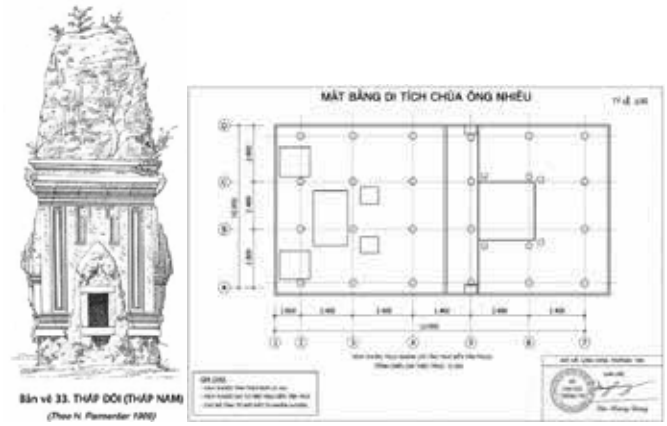
Giai đoạn 1874 - 1954 định hình lớp di sản quy hoạch quan trọng nhất của lõi đô thị. Người Pháp tổ chức cho Quy Nhơn mạng lưới đường phố dạng ô bàn cờ nương theo dải đất ven biển giữa biển và đầm: trục Đông - Tây đóng vai trò trục chính, các tuyến Bắc - Nam tổ chức đón gió biển, các quảng trường và không gian mở ven biển được coi trọng như yếu tố cấu thành cảnh quan đô thị. Kiến trúc công trình mang phong cách Đông Dương và tân cổ điển được "nhiệt đới hóa" - hành lang rộng, cửa lá sách, mái hiên vươn xa - với các đại diện: dinh tỉnh trưởng (dinh Quan Ba, 1925), tòa giám mục, nhà thờ Chính tòa (1938), nhà xứ Quy Hòa (1927), tiểu chủng viện Làng Sông (1930), đại chủng viện Quy Nhơn (1936), hải đăng Nhơn Châu (1925) cùng ga Quy Nhơn và tuyến đường sắt Diêu Trì - Quy Nhơn.

Quy mô của lớp di sản cận đại được định lượng qua thống kê tư liệu lịch sử. Chỉ tính riêng nhóm trường học thời Pháp, tư liệu ghi nhận sáu cơ sở tại Quy Nhơn: trường tiểu học Pháp - Việt (từ 1914, nay là tiểu học Lê Lợi), Collège de Quy Nhơn (từ 1926, gần 400 học sinh, nay là trường Lê Hồng Phong), trường dòng Ecole Gagelin (1932 - 1945, nay là Cao đẳng Y tế), trường tư thục Cẩm Bàn (1934), trường Đào Duy Từ (1935 - 1937) và trường St Vincent de Paul [8, 14]. Nhóm khách sạn - nhà trọ thời Pháp có 13 cơ sở được ghi tên, trong đó khách sạn Morin (Grand Hôtel de Quy Nhơn) quy mô 3 tầng, 30 - 36 phòng [8, 15]. Giai đoạn 1954 - 1975 bổ sung bảy cơ sở giáo dục lớn (trung học Cường Để 1955, Bồ Đề 1957, Sư phạm 1962, Kỹ thuật 1962, Vi Nhân 1963, nữ trung học 1964, Trinh Vương). Bảng 2 tổng hợp số lượng một số loại hình công trình qua các thời kỳ, cho thấy nhịp tăng trưởng đô thị rõ rệt giữa hai giai đoạn cận - hiện đại.

Bảng 2. Thống kê một số loại hình công trình của đô thị Quy Nhơn qua các thời kỳ

Thể loại	Thời Nguyễn	Thời Pháp	Giai đoạn 1954 - 1975
Cửa hiệu và cơ sở kinh doanh	Không có số liệu	69	120
Trường học	Không có số liệu	6	7
Chợ	3	4	5

Nguồn: Tổng hợp từ [8, 14, 15] và niên giám thống kê TP Quy Nhơn các năm 1927, 1930.



Hình 4. Tư liệu bản vẽ di sản kiến trúc: *a) Tháp Đôi (tháp Nam) theo H. Parmentier, 1909 [13]; b) Mặt bằng di tích chùa Ông Nhiêu, tỷ lệ 1/50 (bản vẽ hiện trạng, Sở Văn hóa - Thông tin Bình Định)*

Về chợ, tư liệu các thời kỳ ghi nhận: thời Nguyễn, Quy Nhơn có 4 chợ lớn, huyện Tuy Phước có 26 chợ, toàn tỉnh Bình Định theo bản đồ Duy Tân in năm 1909 có 118 chợ chia 9 hạng thuế; thời Pháp, Quy Nhơn xây mới một chợ lớn nội thị đầu thập niên 1930 và toàn tỉnh năm 1935 có 135 chợ [8, 15]. Các con số này, tuy rời rạc theo từng mốc thống kê cho thấy mật độ thiết chế thương mại - giáo dục đáng kể của một đô thị cảng cửa khẩu, và là bằng chứng định lượng giải thích vì sao lõi đô thị hiện nay chứa quỹ công trình cận đại dày đặc dù phần lớn chưa được định danh.

4. QUỸ DI SẢN KIẾN TRÚC ĐÔ THỊ HIỆN HỮU

4.1. Danh mục hệ thống theo đơn vị hành chính mới

Kết quả khảo sát và đối chiếu tư liệu xác lập quỹ di sản kiến trúc đô thị của khu vực gồm 25 đối tượng và nhóm di sản, được mã hóa thống nhất theo cùng một bộ trường dữ liệu (niên đại, thể loại, quy mô, cấp độ giá trị hiện hành, phân vùng) và chuẩn hóa theo sáu đơn vị hành chính mới từ ngày 01/7/2025 (Bảng 3). Trước nghiên cứu này, địa bàn chưa từng có một danh mục hệ thống cấp vùng - chỉ có các danh mục di tích xếp hạng theo từng đơn vị hành chính cũ và các khảo cứu riêng lẻ.

Bảng 3. Danh mục hệ thống di sản kiến trúc đô thị khu vực nghiên cứu

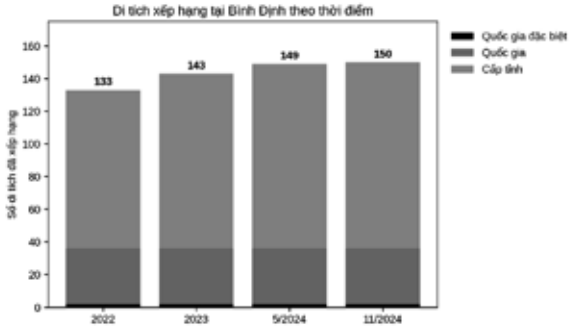
Di sản/nhóm di sản	Niên đại	Thể loại	Quy mô	Cấp độ giá trị hiện hành	Phân vùng
Tháp Đôi	Cuối TK XII	Tôn giáo	Cụm	Quốc gia (1980)	Lõi (phường Quy Nhơn)
Lũy Phương Mai	TK XIX (Minh Mệnh)	Quân sự	Cụm	Tỉnh (2010)	Lõi
Chùa Long Khánh	1715	Tôn giáo	Cụm	Chưa xếp hạng	Lõi
Chùa Ông Nhiêu	TK XVII	Tín ngưỡng	Điểm	Tỉnh	Lõi
Chùa Bà Nước Mặn	TK XVII	Tín ngưỡng	Điểm	Tỉnh	Lõi
Đình Vinh Thạnh	TK XIX (xây lại)	Tín ngưỡng	Cụm	Chưa xếp hạng	Đệm
Lăng Ông Nam Hải	Cuối TK XVIII - đầu XIX	Tín ngưỡng	Điểm	Tỉnh	Đệm (Quy Nhơn Đông)
Hội quán Phúc Kiến	TK XIX	Tôn giáo - giáo dục	Cụm	Chưa xếp hạng	Lõi
Hội quán Quỳnh Phủ	TK XIX	Tôn giáo - giáo dục	Cụm	Chưa xếp hạng	Lõi
Nhà thờ Chính tòa	1938	Tôn giáo	Điểm	Chưa xếp hạng	Lõi (Quy Nhơn Nam)
Nhà thờ Gò Thị	Đầu TK XX	Tôn giáo	Cụm	Chưa xếp hạng	Đệm
Nhà xứ Quy Hòa	1927	Tôn giáo	Điểm	Chưa xếp hạng	Đệm (Quy Nhơn Nam)
Tiểu chủng viện Làng Sông	1930	Tôn giáo - giáo dục	Quần thể	CTKT có giá trị	Đệm
Đại chủng viện Quy Nhơn	1936	Tôn giáo - giáo dục	Cụm	CTKT có giá trị	Lõi
Trại phong Quy Hòa	1927–1945	Y tế - nhà ở	Quần thể	Chưa xếp hạng	Đệm (Quy Nhơn Nam)
Dinh Quan Ba	1925	Công sở	Điểm	Chưa xếp hạng	Lõi
Hải đăng Nhơn Châu	1925	Hạ tầng hàng hải	Điểm	Quốc gia	Mở rộng (xã Nhơn Châu)
Nhà lá mái Nhơn Bình	1945–1975	Nhà ở	Quần thể	Di sản nền	Đệm (Quy Nhơn Đông)
Làng chài Nhơn Lý	1945 - 1975 (làng cũ hơn)	Nhà ở - nghề chài	Quần thể	Di sản nền	Đệm (Quy Nhơn Đông)
Khu phố Pháp (lõi)	1898 - 1954	Quy hoạch - cư trú	Khu vực ĐT	Chưa xếp hạng	Lõi
Ghềnh Ráng - Tiên Sa	—	Cảnh quan - nghỉ dưỡng	Quần thể	Danh thắng tỉnh	Lõi (Quy Nhơn Nam)
Đầm Thị Nại	—	Cảnh quan - sinh thái	Quần thể	Danh thắng	Xuyên các vùng
Kỳ Co - Nhơn Lý	—	Cảnh quan tự nhiên	Quần thể	Chưa xếp hạng	Đệm (Quy Nhơn Đông)

Nguồn: Tổng hợp kết quả khảo sát của tác giả; cấp độ giá trị theo quyết định xếp hạng hiện hành. CTKT: công trình kiến trúc

Đọc hệ thống theo ba bộ phận cấu thành cho thấy giá trị lớn nhất của khu vực nằm ở các dạng tập hợp chứ không ở công trình đơn lẻ. Về di sản quy hoạch - cấu trúc đô thị, kết quả chồng lớp ba bản đồ lịch sử (thời Tự Đức - khoảng 1930 - 1969) cho thấy lưới ô bàn cờ thuộc địa ở lõi các phường Quy Nhơn - Quy Nhơn Nam còn nguyên vẹn về cương ranh từ khi hình thành đến nay, một trường hợp hiếm có ở các đô thị Việt Nam về tính liên tục của cương ranh quy hoạch; song song là cấu trúc hữu cơ dạng "xương cá" của các làng chài Nhơn Lý - Nhơn Hải còn nguyên vẹn. Về di sản cảnh quan, hệ thống núi - đầm - biển vận hành như một hệ thống thị giác - sinh thái duy nhất: từ đỉnh Phương Mai nhìn xuống đầm Thị Nại và lõi đô thị, từ Ghềnh Ráng nhìn ra vịnh trăng khuyết, từ mặt đầm nhìn lên các gò đồi có tháp Chăm. Về di sản công trình, đặc điểm nổi bật là tính "đang sống": chùa - đình - miếu vẫn hành lễ, làng chài vẫn đi biển, nhà thờ - chủng viện vẫn hoạt động, hải đăng vẫn dẫn hướng.

4.2. Thực trạng định danh xếp hạng và điểm nghẽn quản lý

Bức tranh xếp hạng di tích của địa bàn cho thấy nghịch lý quản lý. Toàn tỉnh Bình Định (cũ) có 150 di tích xếp hạng tính đến tháng 11/2024, tăng từ 133 di tích đầu năm 2022 (Hình 5); trong khu vực nghiên cứu, TP Quy Nhơn (cũ) có 10 di tích (3 quốc gia, 7 cấp tỉnh) và huyện Tuy Phước (cũ) có 15 di tích (2 quốc gia, 13 cấp tỉnh) (Bảng 4) [16, 17]. Tốc độ xếp hạng tăng nhưng tập trung ở nhóm di tích lịch sử, trong khi các công trình kiến trúc có giá trị của đô thị phần lớn chưa được xếp hạng.



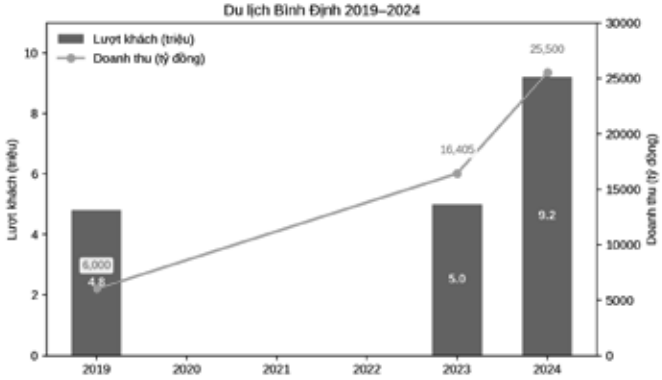
Hình 5. Di tích xếp hạng của tỉnh Bình Định (cũ) giai đoạn 2022 - 2024 [16, 17]

Bảng 4. Di tích xếp hạng trong khu vực nghiên cứu theo đơn vị hành chính

Đơn vị (địa giới cũ)	Đơn vị hành chính mới (từ 01/7/2025)	Số di tích xếp hạng	Quốc gia/cấp tỉnh	Di tích tiêu biểu
Thành phố Quy Nhơn	Phường Quy Nhơn, Quy Nhơn Đông, Quy Nhơn Nam; một phần xã Nhơn Châu	10	3/7	Tháp Đôi; lũy Phương Mai; chùa Ông Nhiêu; chùa Bà Nước Mặn; lăng Ông Nam Hải
Toàn tỉnh Bình Định (cũ)	Tỉnh Gia Lai (mới)	150 (11/2024)	2 QG đặc biệt/34 QG/114 tỉnh	Tăng từ 133 di tích (01/2022)

Nguồn: Quyết định số 16/2024/QĐ-UBND tỉnh Bình Định [18]; tổng hợp từ [16, 17]

Cấu trúc xếp hạng hiện hành có dạng "hình tháp ngược" so với phân bố giá trị thực: đỉnh tháp (di tích quốc gia) ít nhưng đã có chế độ bảo vệ đầy đủ; thân tháp (cấp tỉnh) mỏng; đáy tháp (chưa xếp hạng và di sản nền) rất lớn nhưng gần như chưa có công cụ bảo vệ. Trong danh mục 25 đối tượng, nhóm "chưa xếp hạng nhưng có giá trị xác lập" hai hội quán người Hoa, nhà thờ Chính tòa, khu phố Pháp, các quần thể di sản nền - chiếm tỷ lệ lớn nhất, trong khi áp lực du lịch - dịch vụ tăng nhanh (Hình 6). Đây chính là quỹ di sản nằm ngoài hệ thống bảo vệ hiện hành mà Luật số 45/2024/QH15 mở ra khả năng xếp hạng mới ở cấp quần thể và khu vực đô thị [3].

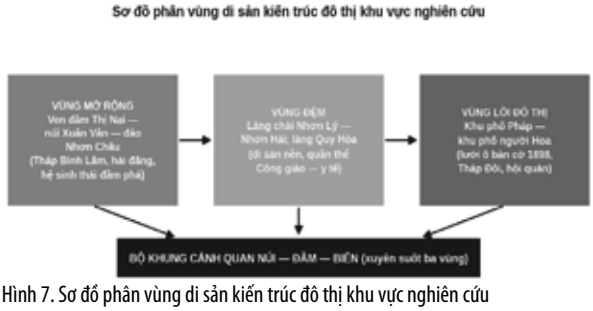


Hình 6. Lượt khách và doanh thu du lịch Bình Định (cũ) 2019 - 2024 [4]

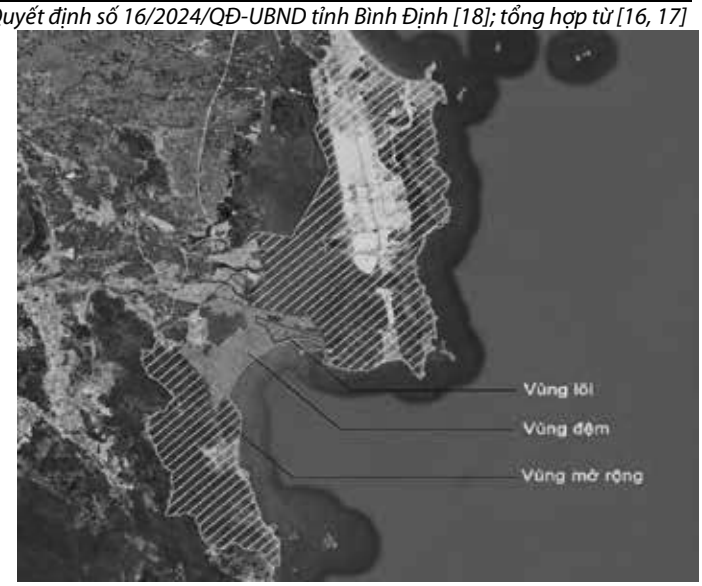
5. PHÂN VÙNG VÀ PHÂN LOẠI HỆ THỐNG

5.1. Phân vùng di sản kiến trúc đô thị

Việc phân vùng dựa trên bốn căn cứ: (i) tiến trình lịch sử với quy luật dịch chuyển trung tâm quanh đầm Thị Nại - phân vùng phải lấy vùng đầm - cửa biển làm tâm chứ không lấy một trung tâm hành chính đương đại; (ii) mật độ và mật độ tương quan của di sản theo địa bàn; (iii) cấu trúc cảnh quan núi - đầm - biển với các "tế bào" cảnh quan tương đối khép kín; và (iv) địa giới hành chính mới theo Nghị quyết 1664/NQ-UBTVQH15, bảo đảm mỗi vùng có một đầu mối quản lý xác định theo mô hình chính quyền địa phương hai cấp [2]. Trên cơ sở đó, hệ thống DSKTĐT của khu vực được phân thành ba vùng: vùng lõi đô thị, vùng đệm và vùng mở rộng (Hình 7, Hình 8). Ba vùng không xếp theo thứ bậc giá trị mà theo mức độ tích tụ di sản và mức độ nhạy cảm trước biến đổi đô thị (Bảng 5).



Hình 7. Sơ đồ phân vùng di sản kiến trúc đô thị khu vực nghiên cứu



Hình 8. Bản đồ phân vùng di sản trên nền địa giới hành chính khu vực (vùng lõi - vùng đệm - vùng mở rộng)

Bảng 5. Đặc trưng và chế độ quản lý ba vùng di sản

Tiêu chí	Vùng lõi đô thị	Vùng đệm	Vùng mở rộng
Địa bàn chính	Phường Quy Nhơn; một phần Quy Nhơn Nam	Phường Quy Nhơn Đông (Nhơn Lý, Nhơn Hải); Quy Nhơn Nam (Quy Hòa)	Ven đầm Thị Nại; núi Xuân Vân; đảo Nhơn Châu
Lớp di sản trội	Pháp thuộc; Việt - Hoa; Chăm (Tháp Đôi)	Di sản nền làng chài; Công giáo - y tế (1927 - 1945)	Chăm sớm; cảnh quan đầm - biển; hạ tầng hàng hải
Dạng tồn tại	Cấu trúc đô thị vận hành + công trình	Quần thể cư trú - di sản nền	Điểm di tích + cảnh quan hệ sinh thái
Giá trị cốt lõi	Cương ranh quy hoạch nguyên vẹn; giao thoa Việt - Hoa	Cấu trúc làng - quan hệ biển; quần thể kiến trúc trong thung lũng	Tính gốc lịch sử; bộ khung sinh thái - thị giác
Công cụ quản lý phù hợp	Quy chế thiết kế đô thị; hồ sơ quần thể kiến trúc đô thị (Luật 45/2024)	Bảo tồn tổng thể; khống chế chiều cao - mật độ; cơ chế lợi ích cộng đồng	Khoanh vùng bảo vệ; hành lang tầm nhìn; sức chứa
Rủi ro chính	Mở đường cắt cấu trúc; tu bổ tự phát mất vật liệu gốc	Thay thế nhà ở bằng lưu trú; mai một lối sống	Lấp đầm, lấn biển; quá tải du lịch cảnh quan

Nguồn: Tổng hợp của tác giả

5.2. Phân loại đa trục và mã hồ sơ di sản

Toàn bộ quỹ 25 đối tượng được phân loại đồng thời theo bốn trục: niên đại (bốn lớp trầm tích: Chăm pa; trung đại Việt - Hoa; cận đại Pháp; hiện đại), thể loại công trình (bảy loại công trình công cộng, nhà ở và công trình công nghiệp), quy mô tổ chức không gian (điểm - cụm - quần thể - khu vực đô thị) và khu vực phân bố (ba vùng nêu trên). Mỗi đối tượng mang đồng thời bốn nhãn, tạo thành "mã hồ sơ di sản đa chiều" mà từ đó suy ra được quyết định quản lý tương ứng - khắc phục khiếm khuyết của cách phân loại truyền thống tách rời các danh sách niên đại, công năng, phân bố thành các hệ thống độc lập (Hình 9). Trục thứ năm - cấp độ giá trị - được tách thành bước đánh giá độc lập bằng bộ tiêu chí định lượng, là nội dung của một bài báo tiếp theo.



Hình 9. Khung phân loại di sản kiến trúc - đô thị khu vực nghiên cứu theo các trục tiêu chí

Đọc đồng thời các trục cho thấy ba hệ quả quản lý. Thứ nhất, nhóm đối tượng "chưa xếp hạng nhưng có giá trị" chiếm tỷ lệ lớn, đây là quỹ di sản nằm ngoài hệ thống bảo vệ hiện hành mà Luật số 45/2024/QH15 mở ra khả năng xếp hạng mới. Thứ hai, các đối tượng cấp quy mô quần thể - khu vực đều là những chỉnh thể đang vận hành, cần công cụ quy hoạch chứ không chỉ công cụ di tích. Thứ ba, phân bố theo sáu đơn vị hành chính mới không đồng đều phường Quy Nhơn và Quy Nhơn Đông đậm đặc nhất cho phép phân bổ trách nhiệm và nguồn lực bảo tồn hợp lý theo mô hình chính quyền hai cấp.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã nhận diện hệ thống di sản kiến trúc đô thị của Cực phát triển Quy Nhơn (hành lang liên kết Đông Tây) tỉnh Gia Lai như một chỉnh thể ba bộ phận trên bộ khung cảnh quan núi - đầm - biển. Ba kết quả chính gồm: (i) tái dựng dòng hình thành di sản năm giai đoạn với quy luật "trung tâm dịch chuyển - bộ khung cảnh quan bất biến" quanh đầm Thị Nại, được minh chứng bằng thống kê tư liệu các thời kỳ; (ii) xác lập quỹ di sản 25 đối tượng và nhóm di sản được mã hóa thống nhất theo đơn vị hành chính mới, cho thấy cấu trúc xếp hạng hiện hành lệch với phân bố giá trị thực - phần lớn giá trị hệ thống nằm ở các quần thể chưa được định danh; (iii) phân vùng lõi - đệm - mở rộng và khung phân loại đa trục làm cơ sở dữ liệu thống nhất cho các bước tiếp theo.

Kết quả nhận diện này là căn cứ trực tiếp để vận dụng Điều 21 Luật số 45/2024/QH15 về xếp hạng "quần thể kiến trúc đô thị, khu vực đô thị" tại địa phương, đồng thời là đầu vào cho việc đánh giá giá trị định lượng bằng bộ tiêu chí và quy trình Delphi - Fuzzy AHP - TOPSIS mà nhóm tác giả đang hoàn thiện. Hướng nghiên cứu tiếp theo gồm: khảo sát bổ sung nhóm di sản công nghiệp - kho tàng còn ít tư liệu; hoàn thiện bản đồ phân vùng chính thức trên nền bản đồ địa chính; và đề xuất hồ sơ xếp hạng cho các quần thể đủ điều kiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] UNESCO. Recommendation on the Historic Urban Landscape, UNESCO World Heritage Centre, 2011.

[2] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 1664/NQ-UBTVQH15 về sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh, cấp xã, 2025.

[3] Quốc hội. Luật số 45/2024/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Di sản văn hóa (hiệu lực 01/7/2025), 2024.

[4] Báo Bình Định/Báo Đầu tư. Kết quả du lịch 2024: 9,2 triệu lượt khách, 25.500 tỷ đồng; mục tiêu 2025, 2025.

[5] K. Taylor. The Historic Urban Landscape paradigm and cities as cultural landscapes. Landscape Research, 2016, doi: 10.1080/01426397.2016.1156066.

[6] M. R. G. Conzen. The analysis of urban form: Alnwick, Northumberland, Institute of British Geographers, 1960.

[7] Nguyễn Quốc Tuấn. Bảo tồn di sản kiến trúc đô thị khu phố Pháp tại Hải Phòng, Luận án Tiến sĩ kiến trúc, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2014.

[8] Đỗ Bang. Lịch sử thành phố Quy Nhơn, NXB. Trẻ, 1998.

[9] Lê Đình Phụng. Kiến trúc Chăm pa ở Bình Định, Luận án Tiến sĩ sử học, 1999.

[10] Nguyễn Xuân Nhân. Cảng thị Nước Mặn và văn hóa cổ truyền, NXB. Khoa học xã hội, 2010.

[11] Đặng Văn Thắng. Hindu temples in Champa culture. International Journal of Advanced Research, 2018, doi: 10.21474/ijar01/6330.

[12] Hội Kiến trúc sư tỉnh Bình Định. Kiến trúc truyền thống Bình Định góp phần gìn giữ bản sắc dân tộc trong kiến trúc hiện đại. Đề tài NCKH cấp tỉnh, 2004.

[13] H. Parmentier. Inventaire des monuments chams de l'Annam, 2 tập, Publications de l'EFEO XI-XII, 1909 - 1918.

[14] Hoàng Bình. Làng Chánh Thành từ năm 1715 đến 1932. Luận văn Thạc sĩ lịch sử, Trường Đại học Quy Nhơn, 2020.

[15] Nguyễn Thanh Quang. Hoài Nhơn, Qui Nhơn, Qui Ninh, Đất và người, NXB. Văn hóa - Văn nghệ, 2020.

[16] Báo Lao Động. Bình Định: 143 di tích được xếp hạng, 10/5/2023.

[17] Báo Thanh Niên. Bình Định: 150 di tích được xếp hạng, 13 bảo vật quốc gia, 21/11/2024.

[18] UBND tỉnh Bình Định. Quyết định số 16/2024/QĐ-UBND về quản lý, bảo vệ, phát huy giá trị di tích, 2024.

[19] ICOMOS. Charter for the Conservation of Historic Towns and Urban Areas (The Washington Charter), ICOMOS, 1987.

[20] Vũ Minh Giang. Di tích và danh thắng Bình Định, NXB. Tổng hợp, 2000.

■Ngày nhận bài: 30/9/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2026

Đặc trưng kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long: Nhận diện hình thái, tổ chức không gian và ngôn ngữ biểu tượng

Architectural characteristics of Khmer pagodas in Vinh Long: Identifying morphology, spatial organization, and symbolic expression

> THS.KTS TRẦN LÊ VĨNH TRÀ[1], PGS.TS.KTS LÊ THỊ HỒNG NA[2,3,*], THS.KTS NGUYỄN DƯƠNG TỬ[4,5]
[1]Khoa Kiến trúc, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
[2]Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM
[3]Đại học Quốc gia TP.HCM
[4]Viện Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[5]Khoa Kiến trúc- Xây dựng, Trường Đại học Thủ Dầu Một
[*]Email: na.bmkt@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhận diện đặc trưng kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long thông qua ba cấp độ: quần thể, công trình và chi tiết kiến trúc. Năm trường hợp được lựa chọn có chủ đích để khảo sát thực địa, đo vẽ, phân tích hình thái và đối sánh về tổ chức không gian, hệ mái, biểu tượng - trang trí và quan hệ với cảnh quan. Kết quả cho thấy các chánh điện đều giữ vai trò hạt nhân của không gian thiêng và nhấn mạnh hệ mái, nhưng khác nhau về tỷ lệ thân - mái, cấu trúc phân tầng và phương phát triển hình khối. Tổ chức quần thể được nhận diện qua bốn dạng chính: hướng tâm, phân tán theo cụm, phân khu theo trục và tập trung. Các nhóm biểu tượng và mô típ trang trí được ghi nhận tại các vị trí như bậc cấp, lan can, đầu hồi, mái và cổng. Đặc trưng kiến trúc của các trường hợp khảo sát được hình thành từ sự thống nhất về nguyên tắc tổ chức và sự đa dạng về hình thức biểu hiện. Kết quả cung cấp cơ sở tham khảo cho việc lập hồ sơ hiện trạng và xác định các thành phần cần ưu tiên khi xem xét sửa chữa, tu bổ.

Từ khóa: Chùa Khmer; Vĩnh Long; hình thái kiến trúc; tổ chức không gian; biểu tượng kiến trúc.

ABSTRACT

This study identifies the architectural characteristics of Khmer pagodas in Vinh Long through three analytical levels: the complex, the building, and architectural details. Five cases were purposively selected for field surveys, measured drawings, morphological analysis, and comparative assessment of spatial organization, roof systems, symbolic and decorative elements, and relationships with the landscape. The findings show that the main halls consistently function as the core of sacred space and emphasize the roof system, while differing in body-to-roof proportions, roof-tier configuration, and volumetric development. Four principal patterns of complex organization were identified: centric, clustered-dispersed, axis-based zoning, and concentrated. Six groups of symbols and decorative motifs were documented at architectural locations including steps, balustrades, pediments, roofs, and gateways. The architectural characteristics of the surveyed cases result from shared organizational principles combined with diverse formal expressions. The findings provide a reference for preparing existing-conditioning documentation and identifying components that should be prioritized when considering repair and restoration interventions.

Keywords: Khmer pagodas; Vinh Long; architectural morphology; spatial organization; architectural symbolism.

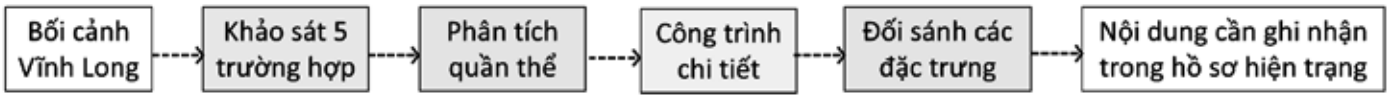
1. TỔNG QUAN

Chùa Khmer ở Nam Bộ vừa là công trình tôn giáo vừa là trung tâm văn hóa, giáo dục và sinh hoạt cộng đồng của người Khmer [1 - 3]. Về kiến trúc, chùa được tổ chức như một quần thể gồm chánh điện, sala, cổng, tháp cốt, sân, không gian mở và cảnh quan; các thành phần này liên kết với nghi lễ, hoạt động cộng đồng và điều kiện cư trú địa phương [4, 5]. Vì vậy, đặc trưng kiến trúc không chỉ được nhận diện qua hình thức chánh điện mà còn qua quan hệ giữa công trình, không gian mở, cảnh quan và hoạt động sử dụng [1, 6].

Các nghiên cứu trước đã đề cập đến vai trò xã hội của chùa Khmer [1, 2], đặc điểm chánh điện, hệ mái [4, 5], sala và biểu tượng

trang trí [6, 7]. Một số nghiên cứu khác tập trung vào giá trị, biến đổi và yêu cầu quản lý di sản ở cấp độ quần thể [3], cũng như các dạng hư hại và giải pháp trùng tu [8]. Tuy nhiên, việc hệ thống hóa mối quan hệ giữa hình thái công trình, tổ chức không gian, hệ mái, biểu tượng và cảnh quan tại Vĩnh Long vẫn còn hạn chế.

Nghiên cứu này nhằm nhận diện và đối sánh các đặc trưng kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long thông qua năm trường hợp khảo sát. Ba câu hỏi được đặt ra gồm: (1) Những đặc điểm nào tạo nên đặc trưng hình thái, không gian và biểu tượng của các chùa được khảo sát? (2) Các đặc điểm này liên kết như thế nào trong cấu trúc quần thể? (3) Những thành phần nào cần được ưu tiên ghi nhận trong hồ sơ hiện trạng phục vụ công tác bảo tồn? Cấu trúc nghiên cứu được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc nghiên cứu nhận diện đặc trưng kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KHUNG PHÂN TÍCH

2.1. Đặc trưng kiến trúc và cấp độ nhận diện

Trong nghiên cứu này, đặc trưng kiến trúc được hiểu là tập hợp các đặc điểm có khả năng quan sát, đo vẽ và đối sánh, đồng thời bao gồm các mối quan hệ giữa những đặc điểm đó trong một loại hình công trình và bối cảnh cụ thể. Đối với kiến trúc tôn giáo, đặc trưng không chỉ biểu hiện qua hình thức mặt đứng hoặc chi tiết trang trí riêng lẻ, mà được hình thành từ bố cục quần thể, tỷ lệ hình khối, cấu trúc mái, trình tự tiếp cận, vật liệu, chi tiết tạo hình và quan hệ với cảnh quan. Cách tiếp cận này cho phép xem xét kiến trúc từ tổng thể đến từng bộ phận, thay vì tách riêng từng chi tiết để mô tả [1, 4, 5].

Đối với chùa Khmer, chánh điện giữ vai trò hạt nhân của không gian thiêng, nhưng bản sắc kiến trúc không chỉ được quyết định bởi hình thức của công trình này. Đặc trưng của quần thể còn được tạo nên bởi quan hệ giữa chánh điện với sala, cổng, tháp cốt, tăng xá, sân, không gian mở, cây xanh và các hoạt động cộng đồng [1, 2]. Vì vậy, việc nhận diện cần được thực hiện đồng thời ở ba cấp độ: quần thể, công trình và chi tiết kiến trúc.

Ở cấp độ quần thể, nghiên cứu xem xét bố cục, vị trí tương đối giữa các hạng mục, trục tiếp cận, sân, khoảng đệm, không gian mở và quan hệ với cảnh quan. Ở cấp độ công trình, các tiêu chí gồm hình khối chánh điện, tỷ lệ nền – thân - mái, cấu trúc và số lớp mái, mặt đứng, bậc cấp, hành lang và hướng tiếp cận [4, 5, 7]. Ở cấp độ chi tiết, nghiên cứu ghi nhận các hình tượng, mô típ trang trí, vị trí biểu đạt, vật liệu và cấu kiện kiến trúc gắn liền. Cách tiếp cận này cho phép nhận diện chùa Khmer như một chỉnh thể kiến trúc - cảnh quan - hoạt động sử dụng, thay vì chỉ xem xét từng yếu tố riêng lẻ.

2.2. Các thành tố phân tích đặc trưng kiến trúc

Khung phân tích tập trung vào sáu nhóm thành tố: giá trị hình thái, giá trị không gian, giá trị biểu tượng, giá trị cảnh quan, giá trị cộng đồng và hiện trạng. Giá trị hình thái phản ánh bố cục, hình khối, tỷ lệ nền - thân - mái, cấu trúc hệ mái, độ dốc mái, mái hiên, đầu đao và nhịp điệu mặt đứng. Giá trị không gian được xem xét qua quan hệ giữa cổng, sân, chánh điện, sala, tháp cốt, tăng xá và các công trình phụ trợ; đồng thời ghi nhận trục tiếp cận, các khoảng chuyển tiếp và mức độ tập trung hoặc phân tán của các hạng mục [1, 4, 5, 7].

Giá trị biểu tượng tập trung vào các hình tượng và mô típ trang trí như Naga, Garuda, Reahu, Yeak, hoa sen và các mô típ thực vật. Việc phân tích không chỉ xác định loại hình tượng mà còn xem xét vị trí biểu đạt tại bậc cấp, lan can, đầu hồi, mái, cổng và mặt đứng. Giá trị cảnh quan phản ánh quan hệ giữa công trình với cây xanh, mặt nước, sân, khoảng đệm, hướng nhìn và các không gian mở.

Giá trị cộng đồng được nhận diện thông qua mối quan hệ giữa kiến trúc và các hoạt động tôn giáo, lễ hội, giáo dục, truyền dạy văn hóa và sinh hoạt xã hội của cộng đồng Khmer. Các không gian như chánh điện, sala, sân chùa, trường học, giảng đường, lối đi và khoảng mở không chỉ có chức năng sử dụng mà còn duy trì sự gắn kết cộng đồng và truyền tải các thực hành văn hóa. Vì vậy, giá trị cộng đồng được xem xét thông qua ba khía cạnh: loại hình hoạt động, không gian diễn ra hoạt động và mối liên hệ giữa hoạt động với các công trình, cảnh quan trong quần thể.

Thông tin hiện trạng được sử dụng như nhóm dữ liệu bổ trợ. Những thay đổi về vật liệu, màu sắc, lớp hoàn thiện, hệ mái, công trình phụ trợ hoặc không gian mở được ghi nhận ở mức độ chúng có thể che khuất, làm gián đoạn hoặc thay đổi khả năng nhận diện các quan hệ hình thái, không gian, cảnh quan và cộng đồng. Cách tiếp cận này không nhằm lượng hóa mức độ suy giảm tổng thể của di sản, mà hướng đến xác định các thành phần cần được lưu ý khi lập hồ sơ hiện trạng và xem xét sửa chữa, tu bổ.

2.3. Khung phân tích và trình tự thực hiện

Trên cơ sở các nghiên cứu về kiến trúc chùa Khmer, vai trò xã hội của ngôi chùa, đặc điểm chánh điện, hệ mái, biểu tượng trang trí và các nguyên tắc bảo tồn [1 - 8], nghiên cứu tổ chức khung phân tích theo ba cấp độ quần thể - công trình - chi tiết. Khung này kết nối sáu nhóm thành tố gồm hình thái, không gian, biểu tượng - trang trí, cảnh quan, giá trị cộng đồng và hiện trạng (Hình 2, Bảng 1). Trong đó, hình thái và tổ chức không gian là hai nhóm chính để nhận diện cấu trúc kiến trúc; biểu tượng, cảnh quan và hoạt động cộng đồng là các lớp bổ sung làm rõ đặc trưng thị giác, quan hệ sử dụng và bối cảnh của quần thể; dữ liệu hiện trạng hỗ trợ xác định các thành phần có khả năng bị tác động khi can thiệp.



Hình 2. Sơ đồ nhận diện đặc trưng kiến trúc chùa Khmer

Khung phân tích được vận dụng theo ba bước. Bước thứ nhất xác định các thành phần kiến trúc có thể quan sát và đo vẽ ở từng trường hợp. Bước thứ hai phân tích mối quan hệ giữa các thành phần trong bố cục quần thể, trục tiếp cận, hệ mái, hệ thống trang trí và cảnh quan. Bước thứ ba so sánh giữa các trường hợp để nhận diện các đặc điểm lặp lại và những khác biệt tại địa phương; các dấu hiệu sửa chữa, bổ sung chỉ được ghi nhận như thông tin hỗ trợ cho việc xác định những thành phần cần ưu tiên duy trì.

Bảng 1. Khung tiêu chí phân tích đặc trưng kiến trúc chùa Khmer

Nhóm phân tích	Thành phần	Nội dung nhận diện
Hình thái	Hình khối và tỷ lệ	Quan hệ nền–thân–mái; tỷ lệ chiều cao và chiều ngang; hướng phát triển hình khối
	Hệ mái	Số lớp mái; độ dốc; mái hiên; đầu đao; đỉnh mái; đường bao và nhịp điệu mái
Không gian	Bố cục quần thể	Vị trí và quan hệ giữa chánh điện, sala, cổng, tháp cốt, tăng xá và công trình phụ trợ
	Trình tự tiếp cận	Quan hệ giữa cổng, sân, trục tiếp cận và chánh điện
	Không gian thiêng	Chánh điện, hành lang, bậc cấp và hướng tiếp cận
	Không gian cộng đồng	Sala, sân lễ hội, sân sinh hoạt và các khoảng mở
Biểu tượng - trang trí	Hình tượng và mô típ	Naga, Garuda, Reahu, Yeak, hoa sen và các mô típ thực vật
	Vị trí biểu đạt	Bậc cấp, lan can, đầu hồi, mái, cổng và mặt đứng
Cảnh quan - cộng đồng	Quan hệ công trình - cảnh quan	Cây xanh, mặt nước, sân, khoảng đệm, hướng nhìn và không gian mở
	Dấu hiệu thay đổi	Thay đổi bề mặt - vật liệu, thành phần hình thái hoặc quan hệ không gian

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài báo sử dụng phương pháp nghiên cứu đa trường hợp, kết hợp khảo sát thực địa, đo vẽ hiện trạng, phân tích hình thái kiến trúc, đối chiếu tư liệu và so sánh giữa các trường hợp. Cách tiếp cận này nhằm nhận diện các đặc điểm lặp lại và khác biệt trong kiến trúc chùa Khmer ở Vĩnh Long, không nhằm tạo mẫu đại diện thống kê cho toàn bộ hệ thống chùa Khmer trong tỉnh.

Năm trường hợp gồm chùa Âng, chùa Hang, chùa Ông Mẹt, chùa Quy Nông và chùa Samrông Ek được lựa chọn có chủ đích. Các trường hợp được lựa chọn theo các tiêu chí: còn nhận diện được cấu trúc quần thể; có chánh điện và một số công trình phụ trợ hoặc không gian mở; thể hiện sự khác biệt về hình thái, hệ mái, tổ chức không gian, biểu tượng và quan hệ với cảnh quan; đồng thời cho phép tiếp cận để khảo sát, chụp ảnh và đo vẽ. Dữ liệu được thu thập từ tháng 5 đến tháng 9/2026, gồm năm bộ bản vẽ và sơ đồ phân tích, khoảng 100 ảnh khảo sát, cùng các tư liệu có thể kiểm chứng về tên gọi, lịch sử hình thành và các đợt xây dựng hoặc trùng tu.

Bảng 2. Thông tin về năm trường hợp khảo sát

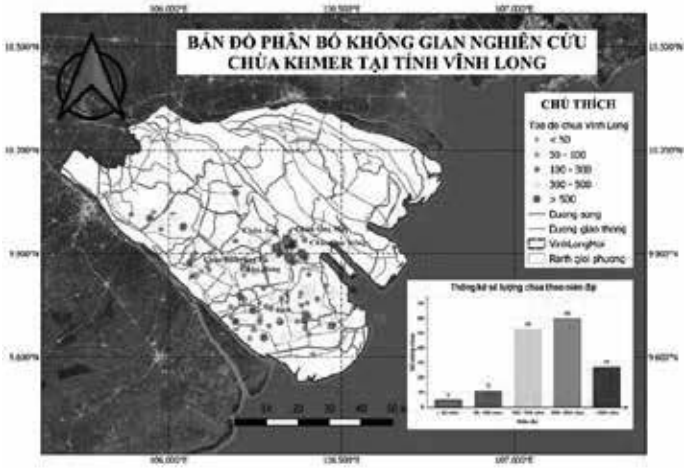
Tên chùa	Quá trình xây dựng - trùng tu	Đặc điểm chọn mẫu	Dạng tổ chức không gian	Đặc điểm hình thái nổi bật
Chùa Âng	• Năm 990: thành lập chùa • Năm 1695: dựng chánh điện bằng tre lá. • Năm 1842: Xây lại chánh điện với quy mô lớn bằng gỗ quý, tường xây, lợp ngói. • Sau đó có nhiều lần trùng tu quy mô nhỏ, bổ sung tăng xá, trai đường và công trình phụ.	Quan hệ rõ với mặt nước và cảnh quan	Hướng tâm	Khối thấp, rộng; mái nhiều lớp
Chùa Hang	• Năm 1637: thành lập chùa. • Năm 1968: bị tàn phá nặng. • Năm 1977: phục dựng lại. Từ năm 1977 - nay có nhiều lần trùng tu, chỉnh trang.	Có các khu chức năng tách biệt	Phân khu theo trục	Mái chồng cấp, thu dần
Chùa Ông Mẹt	• Năm 642: xây chùa, cách vị trí hiện nay 1 km. • Năm 711: di chuyển về vị trí hiện nay. • Đầu thế kỷ XX: trùng tu chánh điện và xây thư viện • Sau đó có nhiều lần sửa chữa nhỏ. Năm 2023: trùng tu lớn chánh điện, thư viện.	Công trình phụ trợ phân tán	Phân tán theo cụm	Điểm nhấn đứng ở trung tâm mái
Chùa Quy Nông	• Chùa được xây năm 614 (tư liệu về Phật giáo Nam tông) hoặc năm 837 (nguồn Khmer). • Năm 2020: 1 tăng xá bằng gỗ của chùa bị hỏa hoạn thiêu rụi. • Chưa tìm được nguồn đủ tin cậy về các lần xây dựng/trùng tu chánh điện.	Cụm công trình gọn, nhiều cây xanh	Tập trung	Mái chính kết hợp mái phụ
Chùa Samrông Ek	• Chùa được xây năm 642 (tư liệu về Phật giáo Nam tông) hoặc năm 1373 (nguồn Khmer). • Năm 1850: xây dựng lại. • Năm 1944: chánh điện được đại trùng tu. • Năm 1964: xây trường Pali. • Năm 1993: xây giảng đường. • Sau đó có tiếp tục được tu bổ.	Khoảng mở trung tâm rõ	Tập trung	Hình khối phát triển theo phương ngang

Đơn vị phân tích được tổ chức theo ba cấp độ. Ở cấp quần thể, nghiên cứu xem xét quan hệ giữa chánh điện, sala, cổng, tháp cốt, tăng xá, sân, lối đi, khoảng mở và cảnh quan. Ở cấp công trình, phân tích tập trung vào hình khối chánh điện, quan hệ nền - thân - mái, hệ mái, mặt đứng, bậc cấp và trình tự tiếp cận. Ở cấp chi tiết, nghiên cứu ghi nhận các hình tượng, mô típ trang trí, vị trí biểu đạt và cấu kiện kiến trúc liên quan.

Quá trình phân tích gồm ba bước. Thứ nhất, xác định các thành phần kiến trúc, không gian và cảnh quan hiện hữu của từng trường hợp. Thứ hai, phân tích mối quan hệ giữa các thành phần, trong đó tổ chức không gian được nhận diện theo vị trí chánh điện, mức độ tập trung của công trình phụ trợ, hướng tiếp cận, trục giao thông, sân và khoảng mở. Hình thái chánh điện được đối sánh theo tỷ lệ thân - mái, số lớp mái, độ dốc, đường bao mái, mái hiên và phương phát triển hình khối; biểu tượng được phân loại theo loại hình tượng, vị trí bố trí và cấu kiện gắn liền. Thứ ba, đối sánh năm trường hợp để xác định các đặc điểm chung và những biến thể về hình thái, không gian, biểu tượng và cảnh quan.

Thông tin hiện trạng được ghi nhận nhằm xác định các thành phần có khả năng bị thay đổi hoặc che khuất khi sửa chữa, bổ sung công trình. Nghiên cứu không đánh giá chuyên sâu về kết cấu, vật liệu hoặc mức độ hư hại kỹ thuật; các thông tin lịch sử và niên đại chỉ được sử dụng như dữ liệu bối cảnh khi có thể kiểm chứng.

4. KHÁI QUÁT HỆ THỐNG CHÙA KHMER Ở VĨNH LONG



Hình 3. Phân bố không gian nghiên cứu chùa Khmer tại tỉnh Vĩnh Long

Vĩnh Long thuộc không gian văn hóa Khmer Nam Bộ, nơi chùa Khmer gắn với khu cư trú, đời sống tôn giáo, sinh hoạt cộng đồng và cảnh quan địa phương. Quần thể chùa thường gồm chánh điện, sala, cổng, tháp cốt, sân, không gian mở và các công trình phụ trợ [2 - 5]. Trong đó, chánh điện giữ vai trò hạt nhân của không gian thiêng, còn các thành phần khác hỗ trợ hoạt động nghi lễ, giáo dục và cộng đồng.

Từ hệ thống này, năm trường hợp gồm chùa Âng, chùa Hang, chùa Ông Mẹt, chùa Quy Nông và chùa Samrông Ek được lựa chọn để khảo sát và đối sánh. Việc lựa chọn nhằm tạo mẫu nghiên cứu có sự khác biệt về hình thái công trình, tổ chức không gian và ngôn ngữ biểu tượng, không nhằm đại diện thống kê cho toàn bộ hệ thống chùa Khmer trong tỉnh. Các trường hợp được phân tích theo ba cấp độ: quần thể, công trình và chi tiết kiến trúc. Hình 3 thể hiện phân bố không gian nghiên cứu chùa Khmer tại tỉnh Vĩnh Long.

5. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

5.1. Hình thái kiến trúc và hệ mái

Qua đối sánh năm trường hợp (Hình 4), hệ mái là thành phần tạo nên khác biệt hình thái rõ nhất giữa các chánh điện. Chùa Âng có khối thấp, rộng với hệ mái nhiều lớp phát triển theo phương ngang; chùa Hang nổi bật với mái chính tương đối gọn và phần trung tâm vươn cao theo phương đứng; chùa Ông Mẹt có hệ mái chồng cấp, thu dần về phía đỉnh; chùa Quy Nông gồm mái chính cao kết hợp các mái phụ bao quanh; trong khi chùa Samrông Ek có mái chính và mái hiên kéo dài, tạo các dải ngang rõ rệt. Sự khác biệt về số lớp mái, độ dốc, tỷ lệ mái - thân và đường bao mái tạo nên các phương thức phát triển hình khối khác nhau. Quan hệ giữa nền, thân và mái, kết hợp với nhịp điệu mặt đứng và các chi tiết trang trí, góp phần định hình đặc trưng của từng chánh điện.



Hình 4. Phân tích hình thái chánh điện chùa Khmer

Sự khác biệt giữa các chánh điện không chỉ nằm ở số lượng lớp mái mà còn ở quan hệ giữa mái và thân công trình. Ở chùa Âng, diện tích mái lớn và phát triển theo phương ngang làm giảm cảm nhận về chiều cao, tạo hình thái thấp và ổn định. Ngược lại, chùa Hang nhấn mạnh phần trung tâm và chiều cao mái, làm tăng tính định hướng đứng của công trình. Chùa Ông Mẹt sử dụng cấu trúc mái chồng cấp để tạo cảm giác vươn cao theo từng lớp, trong khi Quy Nông và Samrông Ek thể hiện sự cân bằng khác nhau giữa mái chính, mái phụ và hiên. Như vậy, hệ mái vừa là thành phần bao che vừa là phương tiện tổ chức tỷ lệ, nhịp điệu và đường bao kiến trúc.

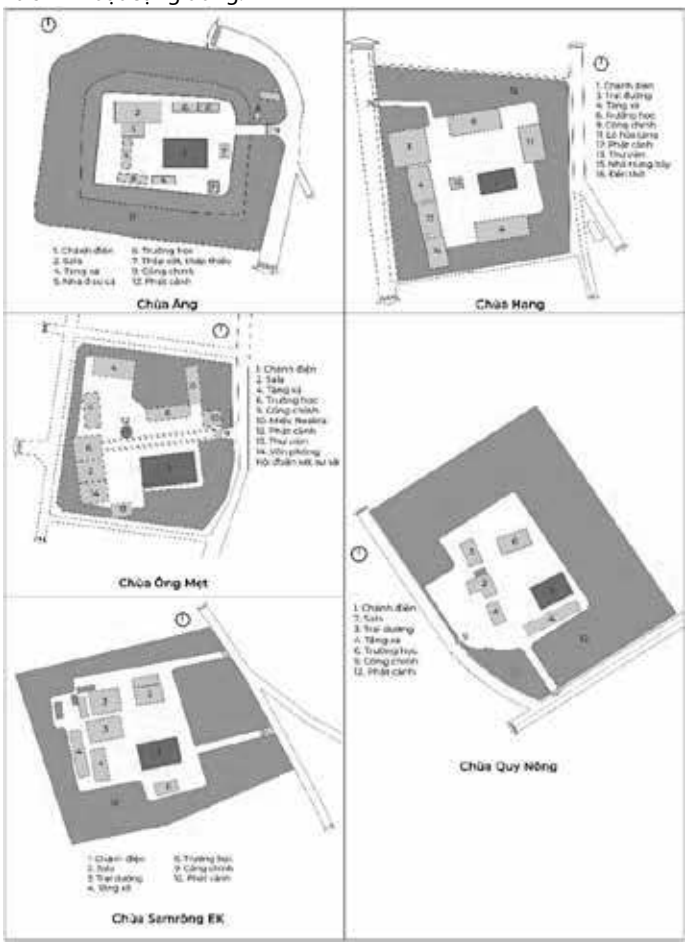
5.2. Tổ chức không gian và cấu trúc quần thể

Phân tích năm trường hợp cho thấy tổ chức không gian chùa Khmer ở Vĩnh Long có thể nhận diện qua các dạng chính: hướng tâm, phân tán theo cụm, phân khu theo trục và tập trung (Hình 5). Chùa Âng có cấu trúc hướng tâm, trong đó chánh điện giữ vị trí trung tâm, còn các công trình phụ trợ được bố trí xung quanh và liên kết với mặt nước, cây xanh cùng các khoảng đệm cảnh quan. Chùa Hang có xu hướng phân khu theo trục, với các khu chức năng được tổ chức thành những nhóm tương đối rõ và liên kết thông qua hệ thống giao thông nội bộ. Chùa Ông Mẹt thể hiện cấu trúc phân tán theo cụm; chánh điện giữ vai trò hạt nhân, trong khi trai đường, tăng xá, trường học và các công trình phụ trợ được bố trí tương đối độc lập, hình thành nhiều khoảng sân và không gian chuyển tiếp. Chùa Quy Nông và chùa Samrông Ek có cấu trúc tập trung, trong đó chánh điện và các công trình phụ trợ tạo thành một cụm tương đối gọn, được bao quanh hoặc đan xen với cây xanh và không gian mở.

Sự khác biệt giữa các dạng tổ chức trên thể hiện trước hết ở vị trí tương đối của chánh điện, mức độ tập trung của các công trình phụ trợ và vai trò của trục tiếp cận, sân trung tâm hoặc khoảng đệm cảnh quan. Dạng hướng tâm được nhận diện khi chánh điện hoặc khoảng trung tâm giữ vai trò tổ chức chính, còn các công trình phụ trợ phân bố tương đối quanh trung tâm. Dạng phân tán theo cụm hình thành khi các hạng mục được chia thành nhiều nhóm tương đối độc lập và liên kết thông qua sân, lối đi hoặc không gian chuyển

tiếp. Dạng phân khu theo trục thể hiện qua sự sắp xếp các khu chức năng dọc theo một hoặc nhiều trục giao thông nội bộ. Trong khi đó, dạng tập trung có đặc điểm là chánh điện và các công trình phụ trợ tạo thành một cụm gọn, với cây xanh và khoảng mở đóng vai trò lớp đệm giữa các hạng mục.

Bốn dạng trên không phải là những kiểu loại cố định cho toàn bộ chùa Khmer, mà là các dạng tổ chức được nhận diện trong phạm vi năm trường hợp khảo sát. Điểm thống nhất giữa các trường hợp không nằm ở một sơ đồ mặt bằng duy nhất, mà ở cấu trúc thứ bậc giữa chánh điện, công trình cộng đồng, không gian mở và cảnh quan. Trong cả năm quần thể, chánh điện đều giữ vai trò hạt nhân của không gian thiêng, dù vị trí của công trình có thể nằm ở trung tâm hình học hoặc được tổ chức lệch về một phía theo điều kiện khu đất và quá trình phát triển. Sala, tăng xá, trường học, sân và các công trình phụ trợ được bố trí để hỗ trợ hoạt động nghi lễ, giáo dục và sinh hoạt cộng đồng.

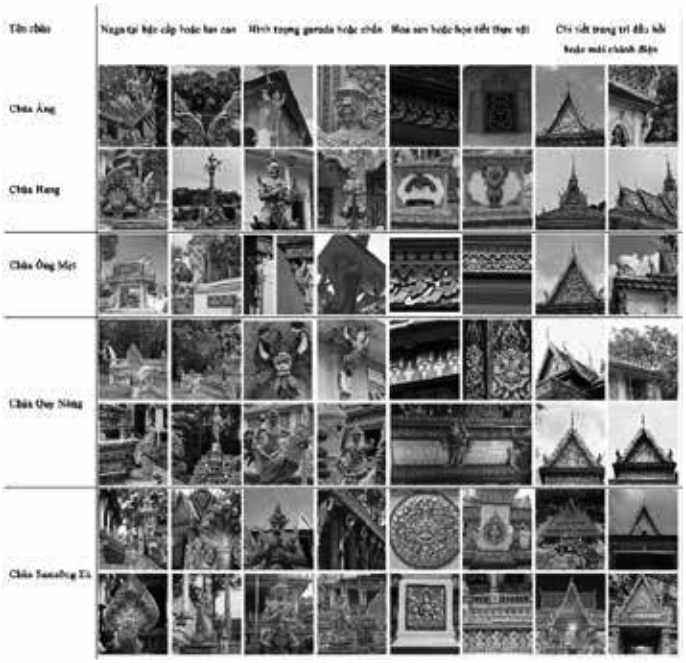


Hình 5. Sơ đồ tổ chức không gian quần thể chùa Khmer. Từ trái sang phải, từ trên xuống dưới: Chùa Âng, chùa Hang, chùa Ông Mẹt, chùa Quy Nông, chùa Samrông Ek

Không gian mở và cảnh quan đồng thời giữ vai trò liên kết các thành phần trong quần thể. Sân chùa tạo nơi tập trung và tổ chức sự kiện; lối đi xác lập trình tự tiếp cận; cây xanh và mặt nước tạo khoảng đệm, hướng nhìn và sự chuyển tiếp giữa các khu vực. Do đó, cấu trúc không gian của chùa Khmer không chỉ được xác định bởi vị trí các công trình mà còn bởi quan hệ giữa công trình, khoảng trống, cảnh quan và hoạt động sử dụng. Kết quả này cho thấy việc nhận diện đặc trưng kiến trúc cần xem xét đồng thời hình học mặt bằng, thứ bậc không gian và khả năng thích ứng của quần thể với điều kiện khu đất, lịch sử phát triển và nhu cầu sinh hoạt của cộng đồng Khmer.

5.3. Biểu tượng, cảnh quan và không gian cộng đồng

Hệ biểu tượng và trang trí tạo nên lớp nhận diện ở cấp độ chi tiết. Các hình tượng và mô típ được ghi nhận tại bậc cấp, lan can, đầu hồi, mái, cổng và mặt đứng; ý nghĩa thị giác của chúng không chỉ nằm ở từng hình tượng mà còn ở vị trí, tỷ lệ và quan hệ với cấu kiện kiến trúc (Hình 6). Đồng thời, cây xanh, sân, mặt nước, khoảng đệm và hướng tiếp cận góp phần tổ chức tầm nhìn, khoảng cách giữa các công trình và mức độ nổi bật của chánh điện. Các hoạt động nghi lễ, lễ hội, giáo dục và sinh hoạt cộng đồng diễn ra tại chánh điện, sala, sân, lối đi và các khoảng mở, qua đó liên kết kiến trúc với cảnh quan và đời sống sử dụng (Hình 7).



Hình 6. Chi tiết biểu tượng và trang trí trên kiến trúc chùa Khmer



Hình 7. Không gian chùa Khmer trong hoạt động cộng đồng

Các biểu tượng không phân bố ngẫu nhiên mà thường gắn với những vị trí có vai trò chuyển tiếp hoặc nhấn mạnh trong không gian, như bậc cấp, lan can, đầu hồi, mái và cổng. Sự gắn kết giữa hình tượng và cấu kiện tạo nên mối quan hệ đồng thời giữa ý nghĩa biểu đạt và tổ chức kiến trúc. Do đó, việc ghi nhận biểu tượng cần vượt qua cách liệt kê hình ảnh, hướng đến mô tả vị trí, tỷ lệ, vật liệu, màu sắc và quan hệ với hướng tiếp cận.

Cảnh quan không chỉ đóng vai trò nền thị giác mà còn tham gia tổ chức khoảng cách, hướng nhìn và trình tự tiếp cận. Mặt nước, cây xanh, sân và khoảng đệm có thể làm nổi bật chánh điện hoặc tạo ranh giới giữa không gian thiêng với khu vực sinh hoạt. Khi các khoảng mở bị thu hẹp hoặc công trình phụ trợ được bổ sung tại các hướng nhìn chính, khả năng nhận diện quần thể có thể bị ảnh hưởng ngay cả khi chánh điện chưa bị thay đổi đáng kể.

5.4. Tổng hợp đặc trưng kiến trúc theo ba cấp độ

Kết quả đối sánh cho thấy đặc trưng kiến trúc của các trường hợp khảo sát được hình thành theo quan hệ từ quần thể đến công trình và chi tiết. Ở cấp quần thể, chánh điện giữ vai trò hạt nhân và được liên kết với công trình phụ trợ, sân, trục tiếp cận và cảnh quan. Ở cấp công trình, hệ mái và quan hệ nền–thân–mái tạo nên dấu hiệu hình thái chủ đạo. Ở cấp chi tiết, biểu tượng và mô típ trang trí được gắn với các cấu kiện cụ thể, góp phần củng cố bản sắc thị giác. Ba cấp độ này không tách rời mà tác động qua lại: bố cục quần thể định hướng cách tiếp cận công trình; hình thái chánh điện xác lập điểm nhấn thị giác; còn chi tiết biểu tượng làm rõ ngôn ngữ kiến trúc.

5.5. Nội dung cần ghi nhận trong hồ sơ hiện trạng

Kết quả nhận diện cho thấy các thành phần cần ưu tiên ghi nhận trước khi sửa chữa, tu bổ gồm bố cục quần thể, chánh điện, hệ mái, mặt đứng chính, bậc cấp, lan can, biểu tượng – trang trí, sân, trục tiếp cận và các hướng nhìn quan trọng. Các can thiệp vào hệ mái, tỷ lệ nền–thân–mái, mặt đứng, khoảng sân hoặc công trình phụ trợ có thể làm thay đổi khả năng nhận diện của quần thể. Nghiên cứu về trùng tu chùa Khmer tại Trà Vinh cũng cho thấy hệ mái, cấu kiện gỗ, nền lát và các chi tiết trang trí là những bộ phận dễ hư hại và cần được đánh giá trước khi tháo dỡ hoặc thay thế.

Vì vậy, hồ sơ trước can thiệp cần bao gồm mặt bằng tổng thể, mặt đứng chính, ảnh các hướng nhìn, sơ đồ hệ mái, danh mục biểu tượng – trang trí, vật liệu hoàn thiện và hiện trạng hư hại của các cấu kiện. Giải pháp sửa chữa cần bảo đảm không làm gián đoạn cấu trúc không gian chủ đạo, che khuất chánh điện hoặc thay đổi các quan hệ hình thái quan trọng. Việc sử dụng vật liệu mới cần được xem xét theo tác động đối với tỷ lệ, đường nét, màu sắc, bề mặt và tính xác thực của công trình. Các hạng mục phụ trợ có thể điều chỉnh linh hoạt hơn nếu không ảnh hưởng đến trục nhìn, sân, khoảng đệm và cấu trúc quần thể.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã nhận diện đặc trưng kiến trúc của năm chùa Khmer ở Vĩnh Long qua ba cấp độ quần thể, công trình và chi tiết. Kết quả cho thấy sự thống nhất giữa các trường hợp nằm ở vai trò hạt nhân của chánh điện, sự nhấn mạnh của hệ mái, mối liên hệ giữa công trình với sân và cảnh quan, cùng sự gắn kết của biểu tượng với các cấu kiện kiến trúc. Sự đa dạng thể hiện ở tỷ lệ thân–mái, phương phát triển hình khối, cấu trúc phân tầng mái và cách tổ chức các công trình phụ trợ.

Từ kết quả này, hồ sơ hiện trạng cần ghi nhận đồng thời bố cục quần thể, hình thái chánh điện, hệ mái, cảnh quan, hướng tiếp cận và các chi tiết biểu tượng. Tuy nhiên, nghiên cứu mới giới hạn ở năm trường hợp và chưa xây dựng bộ chỉ số định lượng về mức độ tương đồng hoặc biến đổi. Các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng mẫu khảo sát, kiểm chứng dữ liệu lịch sử và kết hợp phân tích hình thái với đánh giá kỹ thuật cấu kiện.

Lời cảm ơn: Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Xây dựng Miền Tây, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM, Trường Đại học Thủ Dầu Một, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM vì đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Khắc Cảnh. Văn hóa truyền thống của người Khmer Nam Bộ nhìn từ khía cạnh ngôi chùa. Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ, tập 14, số 3, tr. 87-92, 2011, doi: 10.32508/stdj.v14i3.2000.

[2] Kim Ngân. Chùa Khmer Nam Bộ. Cổng Thông tin đối ngoại Việt Nam, Bộ Ngoại giao Việt Nam, 2013. Internet: https://scov.gov.vn/dat-nuoc-con-nguoi/dat-nuoc-viet-nam/chua-khmer-nam-bo.html (truy cập: tháng 09/2026).

[3] Trần Lê Vĩnh Trà, Ngô Thị Kim Dung. Di sản kiến trúc chùa Khmer vùng Tây Nam Bộ trong bối cảnh đương đại: Giá trị và những thách thức bảo tồn. Tạp chí Xây dựng, số 09/2026, tr. 76-79, 2026, ISSN 2734-9888.

[4] Hứa Sa Ni. Tìm hiểu kiến trúc ngôi Chính điện chùa Khmer ở Nam Bộ. Tạp chí Văn hóa Nghệ thuật, số 599, tháng 3/2025. Internet: https://vanhoanghethuat.vn/tim-hieu-kien-truc-ngoi-chinh-dien-chua-khmer-o-nam-bo-77758420.html (truy cập: tháng 09/2026).

[5] Hứa Sa Ni. Kiến trúc ngôi "Sa-la" trong chùa Khmer. Hội Văn học Nghệ thuật Đồng Nai, 2024. Internet. https://hvhnt.dongnai.gov.vn/pages/newsdetail.aspx?CatId=102&NewsId=3885 (truy cập: tháng 09/2026).

[6] ICOMOS. The Nara Document on Authenticity. Nara, Japan: International Council on Monuments and Sites, 1994.

[7] Tạp chí Nghiên cứu Phật học. Tìm hiểu ý nghĩa biểu tượng kiến trúc chùa Nam tông Khmer, 2025. Internet: https://tapchinghiencuuphathoc.vn/tim-hieu-y-nghia-bieu-tuong-kien-truc-chua-nam-tong-khmer.html (truy cập: tháng 09/2026).

[8] Trần Văn Khánh, Kỷ Minh Hưng. Đánh giá các dạng hư hại và nghiên cứu giải pháp trùng tu di tích chùa Khmer tại tỉnh Trà Vinh. Tạp chí Kiến trúc - Xây dựng (Vietnamarchi.vn), số 250, tr. 81-86, 2024.

■Ngày nhận bài: 03/10/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/10/2026

Đề xuất bộ tiêu chí, quy trình kỹ thuật đánh giá tái sử dụng chất nạo vét vùng cửa sông ven biển Việt Nam

Proposed criteria and technical procedure for assessing the reuse of dredged material from estuarine and coastal areas of Vietnam

> THS MẠC VĂN DÂN, THS ĐỖ QUỲNH NGA, TS PHẠM VĂN HIẾU*
Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển
*Email: hieupv.env@gmail.com

TÓM TẮT

Hoạt động duy tu luồng hàng hải và các cửa sông ven biển phát sinh khối lượng lớn vật chất nạo vét (VCNV), trong khi Việt Nam chưa có bộ tiêu chí và quy trình kỹ thuật riêng để đánh giá, chứng nhận VCNV đủ điều kiện tái sử dụng. Trên cơ sở tổng hợp các hướng dẫn quốc tế và đối chiếu với quy chuẩn, tiêu chuẩn trong nước, nghiên cứu đề xuất bộ tiêu chí M-Kt-Ke-X gồm bốn nhóm: môi trường (M), kỹ thuật (Kt), kinh tế (Ke) và xã hội (X); đồng thời xây dựng quy trình gồm năm giai đoạn: sàng lọc rủi ro môi trường, đánh giá đặc tính cơ lý, xử lý công nghệ, kiểm định trong phòng thí nghiệm và thử nghiệm hiện trường. Ngưỡng phân cấp môi trường được lượng hóa theo QCVN 43:2025/BNNMT. Quy trình cho phép sàng lọc sớm các vật liệu không đáp ứng yêu cầu về môi trường trước khi thực hiện các thí nghiệm tốn kém, làm cơ sở để cơ quan quản lý xem xét chứng nhận chấm dứt trạng thái chất thải, cho phép VCNV đạt chuẩn được sử dụng làm nguyên liệu thứ cấp theo định hướng kinh tế tuần hoàn.

Từ khóa: Vật chất nạo vét; tái sử dụng; bộ tiêu chí M-Kt-Ke-X; hóa rắn; chấm dứt trạng thái chất thải; kinh tế tuần hoàn.

ABSTRACT

Maintenance dredging generates large volumes of dredged material, yet Vietnam has no dedicated criteria or procedure for certifying it for reuse. Based on international guidance and Vietnamese regulations and standards, this study proposes the M-Kt-Ke-X criteria set, covering Environment (M), Engineering (Kt), Economics (Ke) and Society (X), and a five-stage procedure: environmental risk screening, geotechnical characterisation, treatment, laboratory verification and field trials. Environmental classes are quantified against QCVN 43:2025/BNNMT. The procedure screens out unsuitable material before costly testing and gives authorities a basis for end-of-waste certification, so that compliant dredged material can be used as a secondary raw material in line with circular economy policy.

Keywords: Dredged material; beneficial reuse; M-Kt-Ke-X criteria; solidification; end-of-waste; circular economy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trên thế giới, (VCNV; văn bản pháp luật Việt Nam gọi là chất nạo vét) ngày càng được coi là tài nguyên. Quân đoàn Công binh Lục quân Hoa Kỳ (USACE) đặt mục tiêu nâng tỷ lệ sử dụng có lợi VCNV từ 30 - 40% lên 70% vào năm 2030 [1]. Ở châu Âu, theo hướng dẫn của Ủy ban OSPAR [2] và Chỉ thị Khung về chất thải 2008/98/EC [3], các quốc gia phải ưu tiên tái sử dụng, tái chế trước khi cấp phép nhận chìm ở biển; Điều 6 của Chỉ thị quy định cơ chế chấm dứt trạng thái chất thải (End-of-Waste), theo đó vật liệu đã xử lý và đạt tiêu chí được công nhận là sản phẩm [3]. Nghiên cứu ở miền Nam nước Pháp đã chỉ ra các điều kiện then chốt để tái sử dụng VCNV biển ở quy mô lớn [4].

Ở Việt Nam, duy tu cảng biển và cửa sông phát sinh khối lượng lớn VCNV mỗi năm, phần lớn được nhận chìm ở vùng biển xa bờ, vừa tốn chi phí vừa tiềm ẩn tác động môi trường. Trong khi đó, Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) thiếu vật liệu san lấp, còn khai thác cát lòng sông quá mức góp phần gây sụt lún, sạt lở. Các thử nghiệm hóa rắn VCNV luồng Lạch Huyện [5, 6] và trầm tích kênh mương nhiễm phèn ở Bến Tre [7] đã tạo ra vật liệu đắp nền đạt yêu cầu nhưng chưa được nhân rộng.

Nguyên nhân chính là khung pháp lý chưa đồng bộ. Luật Tài nguyên, môi trường biển và hải đảo năm 2015, Nghị định số 57/2024/NĐ-CP và Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT [8, 9] chủ yếu kiểm soát hoạt động nhận chìm. Chưa có tiêu chuẩn quốc gia (TCVN) để chứng nhận VCNV đủ điều kiện sử dụng trên bờ, nên việc lập định mức, thanh quyết toán vốn đầu tư công gặp khó khăn và nhà đầu tư e ngại trách nhiệm pháp lý [10]. Nghiên cứu này đề xuất bộ tiêu chí và quy trình kỹ thuật làm căn cứ để xem xét chấm dứt trạng thái chất thải đối với VCNV.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp phân tích tài liệu thứ cấp được dùng để rà soát hướng dẫn kỹ thuật của USACE [1], Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US EPA) [11], Úc [12] và Ủy ban OSPAR [2] về đặc tính cơ lý, khả năng rò rỉ kim loại nặng và cách thiết lập ngưỡng hành động.

Tài liệu được chọn theo ba tiêu chí: (i) do cơ quan quản lý, tổ chức chuyên ngành ban hành hoặc đăng trên tạp chí có phản biện; (ii) đề cập trực tiếp việc đánh giá, xử lý hoặc tái sử dụng VCNV; (iii) với văn bản quy phạm trong nước, còn hiệu lực tại thời điểm nghiên cứu. Ngưỡng của từng tiêu chí được ưu tiên lấy từ quy chuẩn, tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành; khi trong nước chưa quy định thì dùng giá trị của hướng dẫn quốc tế và ghi rõ nguồn.

Phương pháp đối chiếu quy phạm được dùng để đưa yêu cầu quốc tế vào bối cảnh Việt Nam, trên cơ sở QCVN 43:2025/BNNMT [13], TCVN 9436:2012 [14], TCVN 10379:2014 [15] và pháp luật về môi trường, quản lý nạo vét.

Từ kết quả tổng hợp, nghiên cứu xây dựng khung đánh giá M-Kt-Ke-X (môi trường - kỹ thuật - kinh tế - xã hội), yêu cầu VCNV thỏa mãn đồng thời cả bốn nhóm. Khung được áp dụng theo nguyên tắc sàng lọc tuần tự đạt/không đạt, không chấm điểm, không dùng trọng số: vật liệu phải đạt nhóm M rồi mới xét nhóm Kt, sau đó đến nhóm Ke và X; không đạt ở nhóm nào thì dừng hoặc chuyển sang hướng sử dụng khác.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cơ sở khoa học xây dựng bộ tiêu chí

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy quản lý VCNV đã chuyển từ đổ thải an toàn sang sử dụng có lợi, và việc đánh giá phải xét đồng thời các yếu tố kỹ thuật, môi trường, kinh tế, pháp lý thay vì một thông số đơn lẻ [4, 16].

Khác biệt lớn nhất giữa VCNV với đất đồi hay cát tự nhiên là trạng thái vật lý ban đầu: khi bơm hút thủy lực, độ ẩm của VCNV từ 50% đến hơn 200%, vượt xa giới hạn chảy, và sức kháng cắt gần bằng không [1]. Chất hữu cơ giữ nước, tăng lún và cản trở thủy hóa xi măng, nên vật liệu có hàm lượng hữu cơ trên 10% thường bị loại khỏi vật liệu đắp nền đường [10, 14, 16]. Hàm lượng hữu cơ thường được xác định gián tiếp qua tổn thất khi nung (LOI); với trầm tích giàu sét và carbonat, LOI còn gồm nước liên kết của khoáng vật sét và CO_2 từ carbonat nên cao hơn thực tế, vì vậy cần ghi rõ nhiệt độ nung hoặc dùng tổng cacbon hữu cơ (TOC). Do đó, khử nước và gia cố bằng chất kết dính là công đoạn bắt buộc khi tái sử dụng VCNV.

Về địa hóa, trầm tích hạt mịn và chất hữu cơ hấp phụ mạnh kim loại nặng và hợp chất hữu cơ kỵ nước [4, 17]. Các nước đặt ngưỡng hành động như N1, N2 của Pháp hay ngưỡng ảnh hưởng thấp/trung bình (ERL/ERM) của Hoa Kỳ, nhưng nồng độ tổng không phản ánh đúng mức nguy hại, vốn phụ thuộc vào tính sinh khả dụng. Khi phơi khô, khoáng vật sulfua bị oxy hóa, pH có thể giảm xuống khoảng 2,0 [1, 4], làm Cd, Cu, Pb, Zn hòa tan vào nước rỉ. Vì vậy, cần thử nghiệm chiết độc tính (TCLP) hoặc chiết mô phỏng nước mưa (SPLP), và vật liệu vượt giới hạn phải được hóa rắn trước khi sử dụng.

Nhiều dự án tái sử dụng VCNV thất bại vì không khả thi về tài chính hoặc không được xã hội chấp nhận dù đạt yêu cầu kỹ thuật. Chi phí sàng lọc, khử nước và hóa rắn cần được bù bằng các chi phí tránh được (đền bù bãi chứa, phí đổ thải, tiền mua khoáng sản). Ở Hoa Kỳ, vận chuyển đường bộ chỉ hiệu quả trong bán kính khoảng 80 km [1, 18]; ở ĐBSCL, vận tải thủy rẻ hơn nên cự ly hợp lý cần được xác định theo điều kiện (1) ở mục 3.3.

Về xã hội và pháp lý, khi VCNV bị xếp là chất thải, lo ngại ô nhiễm và thủ tục phức tạp làm giảm giá trị thương mại của vật liệu. Chỉ thị Khung về Chất thải của Liên minh châu Âu cho phép VCNV đã kiểm định đạt chuẩn được phân loại lại thành nguyên liệu thứ cấp [3]; cơ chế này, cùng với công khai số liệu và tham vấn cộng đồng từ sớm, giúp tăng mức độ chấp nhận của xã hội.

3.2. Bối cảnh pháp lý và kỹ thuật tái sử dụng chất nạo vét tại Việt Nam

Khung pháp lý về quản lý VCNV ở Việt Nam còn phân tán. Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 và Luật Tài nguyên, môi trường biển và hải đảo năm 2015 là cơ sở cao nhất; Nghị định số 08/2022/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Bảo vệ môi trường. Nghị định số 57/2024/NĐ-CP [8] quy định quản lý hoạt động nạo vét trong vùng nước cảng biển và vùng nước đường thủy nội địa. QCVN 43:2025/BNNMT (ban hành kèm theo Thông tư số 01/2025/TT-BNNMT, thay thế QCVN 43:2017/BTNMT) [13] quy định giới hạn kim loại nặng và hợp chất hữu cơ khó phân hủy trong trầm tích. Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT (được sửa đổi, bổ sung bởi Thông tư số 23/2022/TT-BTNMT) [9] quy định kỹ thuật đánh giá chất nạo vét, trong đó Phụ lục 01 giới hạn tổng hoạt độ phóng xạ tự nhiên không vượt quá 35.000 Bq/kg. Ngưỡng chất thải nguy hại theo nồng độ ngâm chiết được quy định tại QCVN 07:2025/BNNMT (ban hành kèm theo Thông tư số 44/2025/TT-BNNMT, thay thế QCVN 07:2009/BTNMT và QCVN 50:2013/BTNMT) [19].

Do chưa có TCVN riêng cho VCNV, ngành giao thông và xây dựng phải áp dụng tiêu chuẩn cho đất tự nhiên: TCVN 9436:2012 [14], TCVN 10379:2014 [15], TCVN 4447:2012 và TCVN 5746:2024. Riêng cát biển đã được phép dùng đắp nền đường ô tô theo TCCS 49:2025/CĐBVN [20], kèm điều kiện về chiều cao đắp, độ chặt và chống xâm nhập mặn.

Việc tái sử dụng VCNV hiện gặp ba vướng mắc. Thứ nhất, ngưỡng chất ô nhiễm trong Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT và QCVN 43:2025/BNNMT chưa thống nhất. Thứ hai, TCVN 9436:2012 không cho phép dùng đất đắp có hàm lượng hữu cơ trên 10% và độ trương nở trên 3% [14] mà không xét các chỉ tiêu đã được cải thiện sau hóa rắn, nên VCNV bị loại và thiếu căn cứ lập định mức, đơn giá. Thứ ba, chưa có cơ chế chứng nhận chấm dứt trạng thái chất thải. Để thực hiện Quyết định số 687/QĐ-TTg về phát triển kinh tế tuần hoàn, cần một bộ tiêu chí kết hợp yêu cầu an toàn môi trường với tính khả thi xây dựng (Bảng 1).

Bảng 1. Đối chiếu kinh nghiệm quốc tế, thực trạng Việt Nam và tiêu chí tích hợp đề xuất

Tiêu chí đánh giá	Kinh nghiệm quốc tế (Mỹ, châu Âu, Úc)	Thực trạng tại Việt Nam	Đề xuất tiêu chí tích hợp
Môi trường (M)	Ngưỡng hành động phân bậc (ERL, ERM, N1, N2); bắt buộc thử nghiệm rò rỉ (TCLP/SPLP).	QCVN 43:2025/BNNMT và Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT, chủ yếu phục vụ nhận chìm; chưa quy định thử nghiệm rò rỉ khi sử dụng trên bờ.	Ba cấp M1, M2, M3 theo Bảng 2; bắt buộc thử nghiệm rò rỉ (TCLP).
Kỹ thuật (Kt)	Có tiêu chuẩn riêng cho VCNV; dùng rộng rãi công nghệ hóa rắn; kiểm soát độ ẩm tối ưu, chỉ số sức chịu tải California (CBR), độ nén lún.	Áp dụng tiêu chuẩn cho đất tự nhiên; loại đất đắp có hàm lượng hữu cơ > 10%.	Nhóm Kt1, Kt2, Kt3 theo hàm lượng hữu cơ và thành phần hạt; chấp nhận bùn đã hóa rắn nếu đạt K, CBR, mô đun đàn hồi thiết kế.
Kinh tế (Ke)	Chi phí vòng đời (LCC) và chi phí tránh được (mua cát, bãi chứa có đê bao (CDF)).	Dự toán theo chi phí thi công trực tiếp; chưa có định mức cho công nghệ hóa rắn.	So sánh chi phí vòng đời theo điều kiện (1).
Xã hội và pháp lý (X)	Cơ chế chấm dứt trạng thái chất thải (EU); tham vấn cộng đồng từ sớm.	VCNV vẫn là chất thải; thủ tục cấp phép qua nhiều bộ, ngành.	Chứng nhận nguyên liệu thứ cấp khi VCNV đạt khung đánh giá; công khai dữ liệu quan trắc.

3.3. Đề xuất khung phương pháp M-Kt-Ke-X và quy trình tái sử dụng VCNV

Khung M-Kt-Ke-X yêu cầu VCNV thỏa mãn đồng thời bốn nhóm tiêu chí để được xem xét chứng nhận chấm dứt trạng thái chất thải. Nhóm môi trường có tính phủ quyết, gồm kim loại nặng, hợp chất hữu cơ khó phân hủy, độ mặn, pH, tổng hoạt độ phóng xạ (≤ 35.000 Bq/kg) và kết quả thử nghiệm rò rỉ. Với trầm tích phèn tiềm tàng, cần bổ sung các chỉ tiêu tiềm năng sinh axit (lưu huỳnh khử được, pH sau oxy hóa, khả năng trung hòa axit); vật liệu có tiềm năng sinh axit vượt khả năng trung hòa phải được bổ sung vôi trước khi xử lý tiếp. Ngưỡng phân cấp gồm hai mức (Bảng 2): ngưỡng dưới là giá trị hướng dẫn tạm thời (ISQG) đối với trầm tích biển của Canada [21]; ngưỡng trên là giới hạn của QCVN 43:2025/BNNMT đối với trầm tích nước mặn, nước lợ [13], áp dụng cả cho PAH, PCB và hóa chất bảo vệ thực vật. VCNV được chia thành ba cấp [22]: (M1) mọi thông số không vượt ngưỡng dưới, được ưu tiên tái sử dụng trực tiếp; (M2) có thông số vượt ngưỡng dưới nhưng không vượt ngưỡng trên, và nồng độ ngâm chiết không vượt ngưỡng chất thải nguy hại theo QCVN 07:2025/BNNMT [19]; vật liệu M2 phải hóa rắn và chỉ dùng cho kết cấu được cách ly, tức phần lõi công trình được bao bởi lớp đất ít thấm hoặc vải địa kỹ thuật, không tiếp xúc trực tiếp với nước mặt, nước ngầm; (M3) vượt ngưỡng trên hoặc vượt ngưỡng chất thải nguy hại, phải chuyển cho đơn vị xử lý chuyên ngành [4, 22].

Bảng 2. Ngưỡng phân cấp môi trường đối với kim loại nặng trong VCNV vùng cửa sông, ven biển (mg/kg khối lượng khô)

Thông số	Ngưỡng dưới - ISQG trầm tích biển [21]	Ngưỡng trên - QCVN 43:2025/BNNMT, trầm tích nước mặn, nước lợ [13]
Asen (As)	7,24	41,6
Cadimi (Cd)	0,7	4,2
Chì (Pb)	30,2	112
Kẽm (Zn)	124	271
Đồng (Cu)	18,7	108
Crom (Cr)	52,3	160
Thủy ngân (Hg)	0,13	0,7

Ở vùng cửa sông, rủi ro môi trường còn đến từ chất dinh dưỡng và chất ô nhiễm mới nổi. Trầm tích yếm khí tích lũy amoni và phosphat trong nước lỗ rỗng; khi khử nước trên bờ, các chất này đi vào nước dư, amoni bị nitrat hóa thành nitrat dễ thấm xuống nước ngầm, còn amoni và phosphat có thể gây phú dưỡng nguồn nước tiếp nhận. Vì vậy, nhóm M bổ sung tổng nitơ, tổng phospho trong trầm tích và amoni, nitrat, phosphat trong nước lỗ rỗng hoặc dịch chiết; nước dư, nước rỉ được đối chiếu với quy chuẩn chất lượng nước mặt, nước ngầm. Vi nhựa tích tụ nhiều trong trầm tích hạt mịn nhưng chưa có phương pháp phân tích chuẩn hóa và ngưỡng trong quy chuẩn Việt Nam, nên được đề xuất là chỉ tiêu ghi nhận, chưa dùng để phủ quyết. Ngưỡng dưới ở Bảng 2 là giá trị chung; khi có đủ số liệu khảo sát, có thể dùng phân tích thành phần chính (PCA) và phân tích phương sai (ANOVA) để lượng hóa ảnh hưởng của thành phần hạt, hàm lượng hữu cơ đến hàm lượng và khả năng rò rỉ chất ô nhiễm, từ đó hiệu chỉnh ngưỡng dưới theo nền địa hóa từng vùng; ngưỡng trên vẫn theo quy chuẩn quốc gia vì là căn cứ pháp lý.

Nhóm kỹ thuật (Kt) gồm thành phần hạt, độ ẩm tối ưu, giới hạn dẻo, CBR, mô đun đàn hồi, độ trương nở, hệ số thấm và cường độ sau gia cố. Vật liệu được chia thành ba nhóm, xét hàm lượng hữu cơ trước, thành phần hạt sau: (Kt3) hữu cơ trên 10%, chỉ dùng để phục hồi sinh thái hoặc sản xuất gạch nung; (Kt1) hữu cơ không quá 10% và hạt nhỏ hơn 0,075 mm dưới 50% (cát, sỏi), dùng trực tiếp để đắp nền với K ≥ 0,95; (Kt2) hữu cơ không quá 10% và hạt nhỏ hơn 0,075 mm từ 50% trở lên (bụi, sét dẻo), phải hóa rắn hoặc tách cát. Khi làm nền đường, yêu cầu độ chặt (K = 0,95-0,98) và CBR ngâm bão hòa (≥ 8% với lớp trên cùng của khu vực tác dụng ở đường cấp cao) áp dụng theo từng lớp kết cấu như TCVN 9436:2012 [14]; chỉ số dẻo < 20, độ trương nở ≤ 3%. Lớp móng gia cố chất kết dính phải đạt cường độ chịu nén và ép chẻ ở tuổi quy định theo TCVN 10379:2014 [15] và mô đun đàn hồi > 200 MPa. Với cát biển đắp nền đường, yêu cầu về hàm lượng muối, chiều cao nền đắp (không quá 6 m) và lớp bọc vải địa kỹ thuật tuân theo TCCS 49:2025/CĐBVN [20].

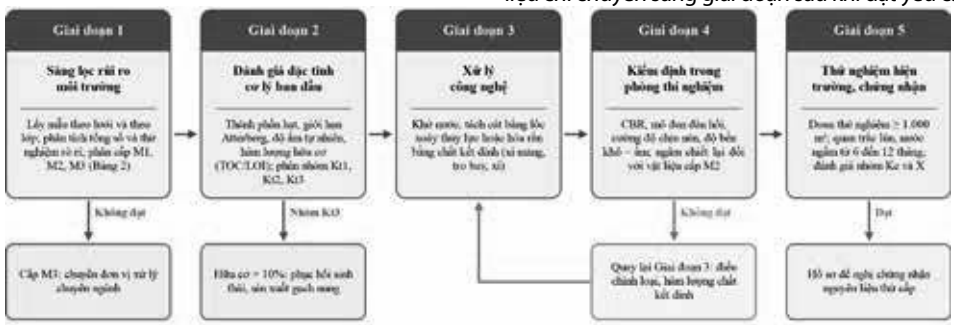
Về kinh tế, phương án được coi là khả thi khi:

$$C_{xl} + C_{vc} \le C_{tn} + C_{tr} \quad (1)$$

trong đó C_{xl} là chi phí xử lý (khử nước, tách cát, hóa rắn); C_{vc} là chi phí vận chuyển đến công trình; C_{tn} là giá vật liệu tự nhiên tương đương tại công trình; C_{tr} là chi phí tránh được (đền bù đất làm bãi chứa, phí đổ thải, chi phí nhận chìm).

Nhóm X được coi là đạt khi: dữ liệu phân tích, quan trắc được công khai; đã tham vấn cộng đồng tại khu vực tiếp nhận và giải trình ý kiến; vị trí sử dụng phù hợp quy hoạch sử dụng đất; có cơ quan chịu trách nhiệm chứng nhận và hồ sơ truy xuất nguồn gốc từng lô vật liệu [4].

Bộ tiêu chí được áp dụng theo quy trình năm giai đoạn (Hình 1); vật liệu chỉ chuyển sang giai đoạn sau khi đạt yêu cầu của giai đoạn trước.



Hình 1. Quy trình kỹ thuật năm giai đoạn trong tái sử dụng vật chất nạo vét

Giai đoạn 1 là sàng lọc rủi ro môi trường. Mẫu được lấy theo lưới phủ toàn bộ khu vực nạo vét, mật độ và số mẫu theo Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT [9]; mẫu lõi lấy hết chiều dày tầng dự kiến nạo vét và chia theo lớp; mẫu tổ hợp chỉ ghép từ các mẫu đơn cùng lớp, cùng khu vực. Mẫu phân tích hữu cơ được bảo quản dưới 4°C, tránh sáng; mẫu phân tích kim loại chứa trong dụng cụ không nhiễm kim loại, theo bộ TCVN 6663 (ISO 5667). Chỉ tiêu phân tích gồm kim loại nặng, hợp chất hữu cơ độc hại, hoạt độ phóng xạ, chất dinh dưỡng, vi nhựa và, với trầm tích phèn, tiềm năng sinh axit. Tổng hàm lượng và kết quả thử nghiệm rò rỉ (TCLP hoặc SPLP) được dùng để phân cấp M1, M2, M3 theo Bảng 2; vật liệu cấp M3 bị loại.

Giai đoạn 2 đánh giá đặc tính cơ lý của vật liệu cấp M1, M2: thành phần hạt, giới hạn chảy, giới hạn dẻo, độ ẩm tự nhiên và hàm lượng hữu cơ (TOC, hoặc LOI có ghi rõ nhiệt độ nung), làm cơ sở dự báo nén lún và xếp nhóm Kt1, Kt2, Kt3.

Giai đoạn 3 là xử lý công nghệ. Nước dư được giảm bằng bãi phơi, ép lọc hoặc ống vải địa kỹ thuật [23]; bùn nhiều cát được đưa qua lốc xoáy thủy lực để thu hồi cát. Bùn sét dẻo và vật liệu cấp M2 được trộn

với chất kết dính vô cơ (xi măng, tro bay, xỉ thép) để hóa rắn, vừa tăng cường độ vừa cố định kim loại nặng [24]. Với trầm tích giàu hữu cơ hoặc sulfat, nên ưu tiên chất kết dính bền sulfat (xi măng bền sulfat, xỉ lò cao, vôi) [10, 24]. Thí nghiệm đầm nén Proctor (tiêu chuẩn hoặc cải tiến, chọn theo loại công trình) xác định độ ẩm tối ưu và dung trọng khô lớn nhất [17]; với hỗn hợp gia cố xi măng, việc đầm nén phải kết thúc trong thời gian cho phép kể từ khi trộn [15].

Giai đoạn 4 là kiểm định trong phòng thí nghiệm: cường độ chịu nén và ép chẻ ở tuổi 7 và 28 ngày, CBR, mô đun đàn hồi, sức kháng cắt ba trục, chỉ số dẻo và độ trương nở được đối chiếu với tiêu chuẩn [14, 15]. Độ bền được đánh giá qua hệ số mềm hóa sau ngâm nước, mức suy giảm cường độ sau các chu kỳ khô - ẩm và nguy cơ ăn mòn sulfat. Vật liệu cấp M2 sau hóa rắn được ngâm chiết lại để xác nhận kim loại nặng đã được cố định. Nếu không đạt, quy trình quay lại Giai đoạn 3 để điều chỉnh loại và hàm lượng chất kết dính.

Giai đoạn 5 là thử nghiệm hiện trường trên đoạn đường hoặc bãi san lấp có diện tích tối thiểu đề xuất là 1.000 m^2, để xác lập sơ đồ lu lèn đạt độ chặt trên 95%. Lún cố kết được quan trắc trong 6 - 12 tháng (bao gồm ít nhất một mùa mưa); nước mặt, nước ngầm (gồm độ mặn, amoni, nitrat, phosphat) được quan trắc định kỳ. Thử nghiệm được chấp nhận khi độ chặt, mô đun đàn hồi hiện trường đạt yêu cầu thiết kế, tốc độ lún và độ lún dư trong giới hạn cho phép, nước rỉ và nước ngầm không vượt quy chuẩn hiện hành, đồng thời vật liệu đạt nhóm Ke và X. Đây là luận cứ để xem xét cấp chứng nhận chấm dứt trạng thái chất thải.

Một số dự án trong nước cho thấy các giải pháp ở Giai đoạn 3 khả thi. Tại luồng Lạch Huyện, bùn sét hóa rắn bằng 4% xi măng và xỉ lò cao đạt CBR trên 20% [5, 6]. Tại Bến Tre, trầm tích kênh mương nhiễm phèn được bổ sung vôi sống và xỉ thép để làm nền đường giao thông nông thôn, đắp đê bao [7]; đây là trầm tích nội đồng nên chỉ được dẫn như ví dụ xử lý trầm tích phèn, khả năng áp dụng cho VCNV cửa sông cần được kiểm chứng qua giai đoạn 4 và 5.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã đề xuất bộ tiêu chí M-Kt-Ke-X và quy trình năm giai đoạn để đánh giá khả năng tái sử dụng VCNV vùng cửa sông, ven biển Việt Nam. Bộ tiêu chí đặt yêu cầu môi trường ngang với yêu cầu địa kỹ thuật; nhóm Ke và X giúp sớm nhận diện các trường hợp dễ thất bại do chi phí hoặc do cộng đồng phản đối; quy trình phân bậc loại bùn nguy hại hoặc giàu hữu cơ ngay từ khâu khảo sát, tránh đầu tư vào thí nghiệm hóa rắn ít triển vọng.

Các thử nghiệm trong nước cho thấy VCNV sau hóa rắn có thể đạt chỉ tiêu cơ lý và thay thế một phần cát tự nhiên, nhưng việc áp dụng còn bị hạn chế bởi năng lực phân tích môi trường và sự thiếu vắng tiêu chuẩn thiết kế riêng.

Nghiên cứu còn hạn chế: bộ tiêu chí được xây dựng từ phân tích tài liệu và đối chiếu quy phạm, chưa được kiểm chứng trên số liệu thực tế của một khu vực cửa sông cụ thể; các ngưỡng về độ bền lâu dài, kinh tế, xã hội cần tiếp tục hiệu chỉnh; chỉ tiêu dinh dưỡng và vi nhựa mới ở mức ghi nhận. Bước tiếp theo là áp dụng thử khung đánh giá cho một số khu vực nạo vét điển hình, dùng thống kê đa biến (PCA, ANOVA) trên R, SPSS hoặc MATLAB để hiệu chỉnh ngưỡng theo nền địa hóa từng vùng, làm căn cứ biên soạn TCVN, hướng dẫn kỹ thuật và định mức cho công nghệ xử lý VCNV.

Kiến nghị cơ quan quản lý thể chế hóa cơ chế chấm dứt trạng thái chất thải cho VCNV đạt tiêu chí kỹ thuật - môi trường, đồng thời ban hành TCVN, định mức và đơn giá riêng cho công nghệ xử lý VCNV.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được thực hiện với sự hỗ trợ từ Đề tài "Nghiên cứu xây dựng bộ tiêu chí, quy trình kỹ thuật đánh giá tái sử dụng chất nạo vét vùng cửa sông ven biển và đề xuất các giải pháp thúc đẩy tái sử dụng chất nạo vét theo hướng kinh tế tuần hoàn", mã số TNMT.ĐL.2025.04.28.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] U.S. Army Corps of Engineers. Dredging and Dredged Material Management. Engineer Manual EM 1110-2-5025, Washington, DC, 920 p, 2015.

[2] OSPAR Commission. OSPAR Guidelines for the Management of Dredged Material at Sea (Agreement 2014-06), London, 2014.

[3] European Parliament and Council of the European Union. Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union, L 312, pp. 3-30, 2008.

[4] G. Dorleon, S. Rigaud, I. Techer. Management of dredged marine sediments in Southern France: main keys to large-scale beneficial re-use. Environmental Science and Pollution Research, vol. 32, no. 28, pp. 16656-16679, 2025, doi: 10.1007/s11356-024-33129-9.

[5] Trần Long Giang. Nghiên cứu gia cố vật chất nạo vét luồng Lạch Huyện làm vật liệu xây dựng công trình. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 65, tr. 59-62, 2022.

[6] Dương Thanh Qui, Phạm Hữu Thiên, Tạ Văn Luân, Lương Đức Long. Đánh giá khả năng sử dụng vật chất nạo vét từ cửa sông, cửa biển làm vật liệu san lấp. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, Bộ Xây dựng, tập 15, số 02, tr. 13-20, 2025.

[7] Phùng Vĩnh An, Tô Quang Trung, Phan Việt Dũng. Giải pháp cải tạo vật liệu nạo vét từ hệ thống công trình thủy lợi để làm nền đường giao thông nông thôn và san lấp mặt bằng trên địa bàn tỉnh Bến Tre. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, số 87, tr. 219-227, 2024.

[8] Chính phủ. Nghị định số 57/2024/NĐ-CP quy định về quản lý hoạt động nạo vét trong vùng nước cảng biển và vùng nước đường thủy nội địa, Hà Nội, 2024.

[9] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Thông tư số 28/2019/TT-BTNMT quy định kỹ thuật đánh giá chất nạo vét và xác định khu vực nhận chìm chất nạo vét ở vùng biển Việt Nam (được sửa đổi, bổ sung bởi Thông tư số 23/2022/TT-BTNMT), Hà Nội, 2019.

[10] A. Ahmed, S. A. Masjuki, S. L. Ibrahim, N. F. H. Abd Halim. Utilisation of dredged sediment as aggregate substitute in cement composites - A review. Construction, vol. 5, no. 2, pp. 233-246, 2025, doi: 10.15282/construction.v5i2.12208.

[11] U.S. Environmental Protection Agency. Beneficial Use Compendium: A Collection of Resources and Tools to Support Beneficial Use Evaluations. p. 138, 2016.

[12] Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts. National Assessment Guidelines for Dredging 2009, Canberra, ACT, Australia, 2009.

[13] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. QCVN 43:2025/BNNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng trầm tích (ban hành kèm theo Thông tư số 01/2025/TT-BNNMT), Hà Nội, 2025.

[14] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9436:2012 - Nền đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, Hà Nội, 2012.

[15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 10379:2014 - Gia cố đất bằng chất kết dính vô cơ, hóa chất hoặc gia cố tổng hợp, sử dụng trong xây dựng đường bộ - Thi công và nghiệm thu, Hà Nội, 2014.

[16] W. Maherzi, F. B. Abdelghani. Dredged marine sediments geotechnical characterisation for their reuse in road construction. Engineering Journal, vol. 18, no. 4, pp. 27-37, 2014, doi: 10.4186/ej.2014.18.4.27.

[17] T. Burt, C. Fletcher. Feasibility of Decontaminating Dredged Material. HR Wallingford, Wallingford, UK, 1999.

[18] T. Burt. Guidelines for the Beneficial Use of Dredged Material. HR Wallingford, Wallingford, UK, 1996.

[19] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. QCVN 07:2025/BNNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về ngưỡng chất thải nguy hại (ban hành kèm theo Thông tư số 44/2025/TT-BNNMT), Hà Nội, 2025.

[20] Cục Đường bộ Việt Nam. TCCS 49:2025/CĐBVN - Nền đường ô tô sử dụng cát biển - Yêu cầu kỹ thuật, Hà Nội, 2025.

[21] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Summary Tables. In: Canadian Environmental Quality Guidelines. Winnipeg, 2001.

[22] J. Pelikan, N. Majnarić, M. Maurić Maljković, K. Pikelj, B. Hamer. Physico-chemical and ecotoxicological evaluation of marine sediments contamination: A case study of Rovinj coastal area, NE Adriatic Sea, Croatia. Toxics, vol. 10, no. 8, p. 478, 2022, doi: 10.3390/toxics10080478.

[23] J. Harrington, G. Smith. Guidance on the Beneficial Use of Dredge Material in Ireland. Irish Environmental Protection Agency, 2013.

[24] S. Kamali, F. Bernard, N. E. Abriak, P. Degrugilliers. Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. Waste Management, vol. 28, no. 5, pp. 919-928, 2008.

■Ngày nhận bài: 12/10/2026 ■Ngày sửa bài: 19/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/10/2026

Chuyển đổi số: Yêu cầu cơ sở dữ liệu phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê khí nhà kính và tối ưu hóa vận hành thông minh hệ thống thoát nước đô thị

Digital transformation: Database requirements for energy audits, greenhouse gas inventories, and intelligent operational optimization of urban drainage and sewerage systems

> THS LÊ THU THỦY[1,2]
[1]Cục Kết cấu hạ tầng xây dựng (Bộ Xây dựng)
[2]NCS Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: thuylethu.bxd@gmail.com

TÓM TẮT

Chuyển đổi số trong thoát nước đô thị đòi hỏi dữ liệu tin cậy để liên kết quản lý tài sản, vận hành và đánh giá hiệu quả. Nghiên cứu tổng hợp tài liệu về năng lượng, khí nhà kính (KNK), công nghệ số và chính sách; sử dụng lưu vực Lê Chân - Nhà máy Xử lý nước thải Vĩnh Niệm, Hải Phòng để minh họa yêu cầu dữ liệu. Bài báo đề xuất ba lớp dữ liệu gồm tài sản - không gian, quan trắc - vận hành và kết quả dịch vụ - hiệu quả hệ thống, tổ chức trong khung Dữ liệu - Quá trình - Năng lượng - KNK - Quyết định. Khung xác định mã định danh, đồng bộ thời gian, kiểm soát chất lượng và truy xuất nguồn gốc để tính suất tiêu thụ năng lượng riêng (SEC), cường độ phát thải KNK (CI), lập đường cơ sở và nhận diện điểm nóng. Lộ trình năm cấp độ được đề xuất cho giai đoạn 2026 - 2035, với thí điểm vận hành thông minh từ năm 2032 và định hướng mở rộng đến năm 2050. Lộ trình đề xuất gắn với năng lực dữ liệu của đơn vị và các mục tiêu quốc gia về chuyển đổi số, giảm phát thải, không thay thế thời hạn pháp lý của các văn bản pháp lý hiện hành. Kết quả cung cấp cơ sở thiết kế thử nghiệm và kiểm chứng tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải KNK trong điều kiện bảo đảm yêu cầu chất lượng dữ liệu.

Từ khóa: Chuyển đổi số; thoát nước đô thị; cơ sở dữ liệu; kiểm toán năng lượng; kiểm kê khí nhà kính; tối ưu vận hành.

ABSTRACT

Digital transformation in urban drainage requires reliable data to link asset management, operation and performance assessment. This study synthesizes literature on energy, greenhouse gases (GHGs), digital technologies and policies, using the Le Chan catchment-Vinh Niem wastewater treatment plant in Hai Phong, Viet Nam, to illustrate data requirements. Three data layers are proposed: assets and spatial information; monitoring and operation; and service outcomes and system performance. These are organized within a Data-Process-Energy-GHG-Decision framework. The framework specifies unique identifiers, time synchronization, quality control and provenance to calculate specific energy consumption (SEC) and GHG emission intensity (CI), establish baselines and identify hotspots. A five-level roadmap is proposed for 2026 - 2035, with smart operation pilots from 2032 and a scale-up perspective to 2050. The roadmap is linked to utilities' data capabilities and national digital transformation and emission reduction objectives; it does not replace legal targets or deadlines. The findings provide a basis for designing trials and verifying energy savings and greenhouse gas emission reductions, provided that data quality requirements are met.

Keywords: Digital transformation; urban drainage; database; energy audit; greenhouse gas inventory; operational optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chuyển đổi số tạo điều kiện chuyển từ quản lý công trình riêng lẻ sang quản trị ngành nước dựa trên dữ liệu [1, 2]. Trong thoát nước đô thị, hệ thống thông tin địa lý (GIS), hệ thống giám sát, điều khiển và thu thập dữ liệu (SCADA), cảm biến và phần mềm quản lý tài sản cung cấp dữ liệu về mạng lưới, lưu lượng, mực nước, thiết bị và quá trình xử lý. Tuy nhiên, dữ liệu phân tán, thiếu đồng bộ thời gian hoặc thiếu thông tin chất lượng có thể làm sai lệch đánh giá năng lượng và phát thải.

Khoảng trống cần giải quyết là cách tổ chức dữ liệu từ cấp công trình đến toàn hệ thống để phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê KNK và hỗ trợ quyết định vận hành. Bài báo đề xuất khung tích hợp dữ liệu và lộ trình ứng dụng, sử dụng lưu vực Lê Chân - Vĩnh Niệm làm trường hợp minh họa, không suy rộng hiệu quả định lượng cho toàn bộ hệ thống thoát nước đô thị Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng hợp tài liệu, đối chiếu yêu cầu về cơ sở dữ liệu (CSDL) của Cơ quan Bảo vệ môi trường Hoa Kỳ (EPA), ENERWATER và hướng dẫn IPCC [3, 4, 5, 6], kết hợp phân tích trường hợp Lê Chân - Vĩnh Niệm từ các nghiên cứu đã công bố [7, 8]. Trình tự gồm: xác định ranh giới; phân rã hệ thống theo công trình đơn vị; lập ma trận nguồn dữ liệu - chỉ số - quyết định; và đề xuất cơ chế kiểm soát chất lượng, phản hồi vận hành.

Ranh giới phân tích bao gồm bể tự hoại (BTH), mạng lưới, kênh hồ, trạm bơm, nhà máy xử lý nước thải và quản lý bùn; nguồn tiếp nhận được xét khi tính phát thải sau xả. Dữ liệu cần được phân biệt thành số đo, số liệu tổng hợp, giá trị ước tính và giả định. Bài báo không thực hiện thử nghiệm điều khiển hoặc công bố một bộ số liệu định lượng mới.

2.1. Tổ chức dữ liệu và kiểm soát chất lượng

1. THU THẬP DỮ LIỆU	2. CHUẨN HÓA CƠ SỞ DỮ LIỆU	3. KIỂM TOÁN NĂNG LƯỢNG VÀ KIỂM KÊ KNK	4. HỖ TRỢ QUYẾT ĐỊNH
- SCADA: lưu lượng, mực nước, trạng thái thiết bị GIS: mạng lưới, công trình, vị trí IoT/quan trắc: điện năng, chất lượng nước	Mã định danh công trình, thiết bị và điểm đo Chuẩn hóa đơn vị, thời gian, nguồn dữ liệu QA/QC, lưu vết, phân quyền và cập nhật	Kiểm toán năng lượng; kiểm kê CH_4, N_2O và phát thải từ điện Lựa chọn hướng dẫn, công cụ theo ranh giới và dữ liệu Tính SEC, CI; xác định điểm nóng	Điều chỉnh bơm, VFD, DO và sục khí Lập, so sánh kịch bản vận hành Ưu tiên bảo trì, đầu tư và giải pháp giảm phát thải
GIÁM SÁT, ĐÁNH GIÁ VÀ PHẢN HỒI (MRV)		**Đo lường → Báo cáo → Kiểm chứng → Cập nhật CSDL → Đánh giá lại SEC, CI và chất lượng xử lý**	
CHU KỲ CẬP NHẬT DỮ LIỆU		Thời gian thực/giờ: SCADA, quan trắc • Ngày: điện năng, vận hành • Tháng: chi phí, tổng hợp • Quý/năm: đường cơ sở, đối sánh, kiểm toán	

Hình 1. Đề xuất quy trình quản trị dữ liệu phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê KNK và hỗ trợ quyết định vận hành

CSDL cần thống nhất mã công trình, thiết bị, điểm đo; đồng bộ thời gian; lưu dữ liệu gốc, lịch sử hiệu chỉnh và phân quyền truy cập [3, 9]. Bảng 4 phân biệt dữ liệu tối thiểu để tính chỉ số, ước tính phát thải trong ranh giới lựa chọn với dữ liệu bổ sung để phân tích chuyên sâu. Mỗi bản ghi phải nêu nguồn, đơn vị và trạng thái: đo trực tiếp, suy tính hoặc ước tính. Thông số bổ sung trở thành cần thiết khi lựa chọn bài toán phân tích tương ứng. QA/QC là bảo đảm và kiểm soát chất lượng; MRV là đo lường, báo cáo và kiểm chứng.

Kiểm tra chất lượng bằng đối soát điện với hóa đơn, phụ tải; lưu lượng với cân bằng nước; cảm biến với phép đo kiểm tra và hồ sơ hiệu chuẩn. Dữ liệu thiếu, bất thường phải được đánh dấu trạng thái, lưu nguyên bản và ghi cách xử lý; chỉ nội suy khoảng thiếu ngắn khi có căn cứ về vận hành ổn định. Nếu thiếu đầu vào cốt lõi hoặc sai lệch chưa được kiểm soát, kết quả chỉ dùng sàng lọc, không dùng khẳng định mức tiết kiệm hay giảm phát thải. Phân tích độ nhạy và độ không chắc chắn cần tập trung vào các biến chi phối; lưu hệ số, giả định và phiên bản tính [6, 9].

Chu kỳ cập nhật CSDL phụ thuộc mục đích sử dụng và năng lực đo: dữ liệu thiết bị theo khoảng thời gian ngắn; lưu lượng và điện năng tổng hợp theo ngày; chất lượng nước theo chương trình quan trắc; chi phí theo tháng; đường cơ sở rà soát định kỳ hoặc khi thay đổi đáng kể về tải lượng, công nghệ hay chế độ vận hành.

Bảng 1. Liên kết dữ liệu, chỉ số và quyết định vận hành theo hợp phần [3, 5, 9]

Lớp	Dữ liệu	Phân tích	Đầu ra quyết định
Mạng/trạm bơm	Q, mực nước, mưa, thời gian chạy, kWh	SEC bơm, bất thường, xu thế	Lịch bơm, VFD, cảnh báo
Nhà máy xử lý nước thải: Sinh học/sục khí	Q, BOD/COD, DO, MLSS, kWh lưu lượng/chất lượng nước thải đầu vào - đầu ra	SEC sục khí, tải hữu cơ, DO	Giá trị đặt DO, máy thổi khí/VFD
Bùn	Lưu lượng bùn, SRT, kWh	SEC bùn, tiềm năng thu hồi	Bơm bùn, thu hồi năng lượng
Ngập úng	Mưa, mực nước, cống, hồ, cửa xả, trạm bơm, điểm ngập	Cảnh báo, dự báo và điều hành thoát nước, tối ưu hóa vận hành	Liên kết GIS – SCADA – mô hình thủy văn, thủy lực
Toàn hệ thống	Điện, CH_4, N_2O, CO_2e	SEC, CI, benchmark, điểm nóng	Ưu tiên giải pháp và đầu tư

Bảng 2. Nguồn phát thải chính và yêu cầu dữ liệu theo hợp phần [6, 9]

STT	Hợp phần hệ thống	Nguồn cần xem xét	Cơ chế phát sinh	Yêu cầu dữ liệu
1	Bể tự hoại	CH_4	Phân hủy kỵ khí chất hữu cơ; lưu giữ bùn trong thời gian dài	Tải hữu cơ, số người sử dụng, tỷ lệ đấu nối, chế độ hút bùn
2	Mạng lưới cống thu gom	CH_4	Điều kiện yếm khí trong cống, hố ga, cống áp lực; giải phóng khí hòa tan	Cần khảo sát thời gian lưu, COD, nhiệt độ và điểm phát tán khí
3	Hồ điều hòa, kênh mương	CH_4; N_2O khi có cơ sở áp dụng	Lắng cặn hữu cơ và phân hủy kỵ khí cục bộ	Quan trọng với hệ thống thoát nước hỗn hợp, có hồ điều tiết
4	Trạm bơm	KNK từ điện; CH_4 hòa tan giải phóng	Tiêu thụ điện; khuấy trộn và giải phóng khí trong hố thu	Cần đo điện năng, lưu lượng, thời gian vận hành
5	Nhà máy XLNT	CH_4, N_2O; KNK từ điện	Sục khí, xử lý sinh học, lắng, khử trùng và vận hành thiết bị	Là khu vực có dữ liệu vận hành rõ nhất và dễ kiểm toán theo unit process
6	Xử lý bùn	CH_4, N_2O; KNK từ năng lượng và vận chuyển	Nén bùn, lưu chứa, ép bùn, vận chuyển và xử lý cuối cùng	Khối lượng, chất khô, chất hữu cơ, tuyến vận chuyển và phương án xử lý cuối cùng

CSDL thoát nước cần phản ánh ba lớp thông tin: (i) tài sản và không gian; (ii) quan trắc và quá trình vận hành; (iii) kết quả dịch vụ và hiệu quả hệ thống. Dữ liệu cốt lõi gồm bể tự hoại, tuyến thu gom mạng lưới cống, giếng tách, hồ điều hòa, trạm bơm, nhà máy xử lý nước thải, lưu lượng, mực nước, chất lượng nước, điện năng, bùn thải, bảo trì và sự cố.

Đối với hệ thống cống chung, dữ liệu cần phản ánh chế độ mưa, ngập úng, nguồn tiếp nhận và vận hành theo mùa; thông số đầu vào được tổng hợp tại Bảng 4 [6, 9].

2.2. Ranh giới kiểm kê và yêu cầu dữ liệu phát thải

Tổng hợp từ các yêu cầu dữ liệu và các phương pháp tính toán kiểm kê KNK theo kinh nghiệm quốc tế. Bảng 2 tập trung đưa ra yêu cầu dữ liệu kiểm kê đối với CH_4, N_2O và phát thải liên quan năng lượng. CO_2 có nguồn gốc sinh học cần được phân biệt và báo cáo theo hướng dẫn áp dụng; tránh cộng mặc định cùng CH_4 và N_2O.

2.3. Phương pháp tính và chỉ số đánh giá

Độ tin cậy của kết quả kiểm kê phụ thuộc đồng thời vào sự phù hợp của phương pháp, chất lượng dữ liệu đầu vào và mức độ hiệu chuẩn, kiểm chứng các tham số. Cần thống nhất ranh giới, đơn vị đo, kỳ tính toán và nguồn dữ liệu trước khi đối chiếu kết quả. Cơ sở lựa chọn dữ liệu, hệ số và kiểm soát chất lượng là điều kiện tiên quyết [6, 9].

Tham khảo và đối chiếu hướng dẫn kiểm kê của Ủy ban liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) [6], công cụ đánh giá và giám sát hiệu quả năng lượng và phát thải KNK (ECAM) [9], cách tính theo công trình đơn vị và mô hình động học. Các cách tiếp cận này có mục đích khác nhau: ECAM hỗ trợ đánh giá theo chuỗi dịch vụ; công trình đơn vị là cách phân rã hệ thống; mô hình động học cần dữ liệu hiệu chỉnh và kiểm chứng riêng. Do đó, không suy ra cấp Tier chỉ từ tên công cụ hoặc mức chi tiết của sơ đồ công nghệ.

IPCC hướng dẫn tính phát thải theo nguồn; ECAM hỗ trợ liên kết dữ liệu năng lượng, phát thải và đánh giá giải pháp [6, 9]. Cân bằng vật chất giúp truy vết tải lượng giữa các công trình, còn mô hình động học hỗ trợ giải thích biến động quá trình. Cần thống nhất ranh giới, kỳ tính, hệ số và tải lượng khi đối sánh. Tier thể hiện cấp phương pháp và độ sâu chi tiết của dữ liệu kiểm kê; Scope thể hiện phạm vi phát thải theo ranh giới tổ chức. Tổng hợp so sánh các phương pháp và cách tiếp cận tính toán kiểm kê KNK thể hiện như Bảng 3.

Bảng 3. So sánh các cách tiếp cận và điều kiện dữ liệu

TT	Phương pháp/công cụ	Phạm vi áp dụng	Ưu điểm	Hạn chế cần lưu ý
1	IPCC 2006/2019	CH_4 và N_2O từ xử lý, xả nước thải; điện được tính riêng	Hướng dẫn kiểm kê quốc gia; vận dụng cho cơ sở khi xác định rõ ranh giới	Độ chính xác phụ thuộc hệ số mặc định và chất lượng dữ liệu đầu vào
2	ECAM	Đánh giá năng lượng và phát thải carbon trong cấp thoát nước	Tích hợp dữ liệu năng lượng và phát thải theo chuỗi dịch vụ	Cần dữ liệu vận hành tương đối đầy đủ và nhất quán
3	Unit process	Tính theo từng công trình đơn vị và từng thiết bị	Xác định điểm nóng phát thải, hỗ trợ đề xuất giải pháp cụ thể	Yêu cầu đo đạc chi tiết lưu lượng, tải lượng, điện năng, thời gian vận hành
4	Mô hình động học	Mô phỏng quá trình sinh học, nitrat hóa, khử nitrat và phân hủy hữu cơ	Tăng khả năng giải thích cơ chế phát thải	Cần hiệu chỉnh tham số theo điều kiện địa phương

Bảng 4. Nhóm dữ liệu đầu vào phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê KNK và tối ưu vận hành [3, 5, 6, 9]

Nhóm dữ liệu	Dữ liệu cơ bản	Dữ liệu bổ sung	Đơn vị	Mục đích và kiểm soát
Ranh giới và tài sản	Mã, phạm vi, công nghệ; dân số phục vụ, BTH (thuộc ranh giới/pham vi tính toán)	GIS chi tiết; liên kết công trình-thiết bị-điểm đo	Mã; người; %	Phân bổ, tránh bỏ sót hoặc trùng; đối chiếu GIS, hồ sơ công trình
Thủy lực và mùa	V theo kỳ, Q; thông tin mưa-khô	Chuỗi Q, mực nước, cột áp, HRT	m^3; m^3/ngày; m; giờ	Cân bằng nước, xét pha loãng; đồng bộ đo lưu lượng, SCADA, trạm mưa
Chất lượng nước	BOD_5/COD, TN đầu vào-ra đại diện kỳ đánh giá	NH_4^+-N; tải lượng theo công trình, lấy mẫu theo biến động	mg/L; kg/ngày	Tải lượng, hiệu quả xử lý; ghi phương pháp, vị trí và thời điểm lấy mẫu
Năng lượng và thiết bị	E tổng; E nhóm khi đánh giá theo phụ tải	Đo điện chi tiết; công suất, giờ chạy, trạng thái VFD	kWh/kỳ; kW; giờ	SEC, đường cơ sở; đối soát đồng hồ điện, hóa đơn và SCADA
Bùn và khí thu hồi	Lượng bùn, TS, phương án xử lý; CH_4 thu hồi nếu khấu trừ	VS/TS; lưu lượng, thành phần khí sinh học	tấn/kỳ; %; m^3/kỳ; kg CH_4/kỳ	Cân bằng hữu cơ, thu hồi; nhật ký, phân tích, đo khí và điều kiện quy đổi
Trạng thái quá trình	Công nghệ, chế độ vận hành, nhiệt độ và sự cố	pH, DO, MLSS, SRT; dữ liệu biến động công nghệ	°C; pH; mg/L; ngày	Giải thích biến động; kiểm tra chéo cảm biến, mẫu và nhật ký hiệu chuẩn
Hệ số và quy đổi	B_0, MCF, EF điện, EFN, GWP có nguồn, năm áp dụng	Hệ số đặc thù; phạm vi biến thiên, độ không chắc chắn	Theo chú thích	Tính KNK, phân tích độ nhạy; lưu nguồn, phiên bản và điều kiện áp dụng
Siêu dữ liệu và QA/QC	Nguồn, thời gian, đơn vị; đánh dấu số đo/ước tính, dữ liệu thiếu	Lịch sử hiệu chỉnh; sai lệch, độ không chắc chắn theo biến	Thời gian; %; trạng thái	Truy xuất, giới hạn sử dụng; lưu bản gốc, bản hiệu chỉnh và hồ sơ kiểm tra

(*) Dữ liệu tối thiểu áp dụng cho ranh giới và chỉ số lựa chọn; chưa đủ dữ liệu cốt lõi thì chưa đủ cơ sở tính hoặc kiểm chứng chỉ số đó. TS: hàm lượng chất khô; VS/TS: tỷ lệ chất rắn bay hơi trong chất khô; NH_4^+-N tính theo N. B_0: kg CH_4/kg COD hoặc BOD; MCF không thứ nguyên; EFN: kg N_2O-N/kg N; EF điện: kg CO_2e/kWh hoặc t CO_2e/MWh; GWP_{100}: kg CO_2e/kg khí. Hệ số phải lưu theo năm, nguồn và phương pháp áp dụng. HRT/SRT là thời gian lưu thủy lực/lưu bùn; MLSS là chất rắn lơ lửng trong hỗn hợp bùn.

Bảng 5. Biểu thức tính và chỉ số đánh giá cơ bản [3, 6, 9]

STT	Nội dung	Công thức/chỉ số	Đơn vị (quy đổi CO_2 tương đương)	Ghi chú
1	Phát thải CH_4 theo tải COD	$GHG_CH_{4,i} = [(L_i - S_i) \times B_0 \times MCF_i - R_i] \times GWP_CH_4$ (1)	$kgCO_2e$	Dạng khái quát theo tải hữu cơ; tránh tính trùng nước và bùn
2	Phát thải N_2O	$GHG_N_2O = N \times EFN \times (44/28) \times GWP_N_2O$ (2)	$kgCO_2e$	Tính riêng xử lý và sau xả; EFN biểu thị theo N_2O-N
3	Phát thải KNK gián tiếp từ điện	$GHG_điện = E \times EF_điện$ (3)	$kgCO_2e$	Phụ thuộc hệ số phát thải lưới điện
4	Suất tiêu thụ năng lượng riêng	$SEC = E/V$; $SEC_i = E_i/V$ (4)	kWh/m^3	Cùng kỳ tính; công bố mẫu số khi phân bổ theo công trình
5	Cường độ phát thải KNK	$CI = GHG/V$ (5)	$kgCO_2e/m^3$	Cùng kỳ và ranh giới; nêu thể tích xử lý hoặc thể tích dịch vụ

Trong Bảng 5, L_i là tải lượng hữu cơ phân bổ cho hợp phần i, S_i là phần hữu cơ tách sang bùn và R_i là lượng CH_4 được thu hồi, tính bằng kg theo cùng kỳ. B_0 và MCF phải phù hợp với cơ sở COD hoặc BOD đã chọn. N là tải lượng nitơ (kg N); EFN có đơn vị kg N_2O-N/kg N nên phải nhân 44/28 để quy đổi sang N_2O [6]. Phát thải từ quá trình xử lý và sau xả dùng tải lượng, hệ số tương ứng và được tính riêng. E và V lần lượt là điện năng (kWh) và thể tích nước (m^3) trong cùng kỳ; Q là lưu lượng (m^3/ngày). GHG là tổng phát thải trong ranh giới đã công bố, tính bằng kg CO_2e. Hệ số điện và GWP phải ghi rõ nguồn, năm áp dụng và phiên bản; không cộng lặp tải hữu cơ giữa nước và bùn hoặc giữa các công trình nối tiếp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Từ SCADA giám sát đến SCADA hỗ trợ quyết định

SCADA cung cấp dữ liệu trạng thái và lịch sử vận hành; lớp phân tích đề xuất liên kết dữ liệu này với chỉ số hiệu suất (KPI). Ví dụ, oxy hòa tan (DO) cần được phân tích cùng tải lượng, lưu lượng, công suất máy thổi khí và chất lượng nước đầu ra; vận hành bơm cần gắn với mực nước, lưu lượng, cột áp và điện năng. Cảnh báo phải phân biệt biến động quá trình với sai lệch cảm biến. Từ dữ liệu SCADA chuẩn hóa và đo đạc kiểm chứng thực tế sẽ đề xuất các giải pháp điều chỉnh chế độ vận hành để tối ưu hóa, tiết kiệm năng lượng đặc biệt trong quá trình sục khí. Đề xuất điều chỉnh chỉ được áp dụng trong giới hạn công nghệ và an toàn vận hành đã xác định. Yêu cầu liên kết dữ liệu và mô hình phù hợp với tổng quan về bản sao số [10, 11].

3.2. Minh họa yêu cầu dữ liệu tại Lê Chân - Vĩnh Niệm

Các nghiên cứu về sử dụng năng lượng tại nhà máy xử lý nước thải [7] và kiểm kê KNK tại Lê Chân - Vĩnh Niệm [8] là cơ sở minh họa mối liên hệ giữa dữ liệu công nghệ, điện năng và phát thải. Trong bài báo này, trường hợp nghiên cứu được dùng để xác định trường dữ liệu và luồng xử lý thông tin; chưa sử dụng để khẳng định mức tiết kiệm thực đo hoặc hiệu quả điều khiển tự động.

Vòng phản hồi đề xuất gồm thu nhận dữ liệu → kiểm tra, đồng bộ → tính SEC, CI → đối chiếu đường cơ sở → xác định nguyên nhân → đề xuất điều chỉnh bơm, biến tần (VFD), sục khí → đánh giá lại. So sánh trước–sau cần cùng kỳ tổng hợp, ranh giới và mẫu số; đồng thời xét tải lượng, mùa và yêu cầu xử lý tương đương. Nước mưa pha loãng làm thay đổi lưu lượng, nồng độ và có thể làm SEC, CI theo m^3 giảm mà chưa phản ánh cải thiện thực chất. Khi đủ số liệu, bổ sung chỉ số theo tải lượng COD hoặc nitơ loại bỏ, đối chiếu cả lượng điện và tổng phát thải [3, 5, 9].

3.3. Kiến trúc Data-Process-Energy-GHG-Decision

Trong kiến trúc đề xuất, cơ sở dữ liệu liên kết dữ liệu vận hành với từng công trình đơn vị, tạo cơ sở xác định SEC, CI theo cùng kỳ và ranh giới tính toán, đồng thời truy vết nguyên nhân biến động. Kết quả kiểm toán và kiểm kê được cập nhật trở lại để hỗ trợ so sánh trước - sau, đo đạc, báo cáo và thẩm tra (MRV), lựa chọn và kiểm chứng giải pháp trên cơ sở chất lượng dữ liệu và yêu cầu xử lý. Bảng 6 trình bày chức năng của năm khối liên kết: **Dữ liệu - Quá trình - Năng lượng - KNK - Quyết định**.

CSDL liên kết các khối bằng mã công trình và mốc thời gian, cho phép truy xuất số đo, giả định, hệ số và kết quả. Giảm CI là giảm phát thải trên một đơn vị thể tích, không đồng nghĩa giảm tổng phát thải nếu thể tích dịch vụ tăng. Vì vậy, cần báo cáo đồng thời SEC, CI, thể tích nước, tải lượng, chất lượng đầu ra và tổng phát thải trong cùng ranh giới. Chỉ kết luận hiệu quả sau khi xét điều kiện so sánh và độ không chắc chắn; tiết kiệm điện phải được kiểm tra cùng CH_4, N_2O trực tiếp để tránh chuyển dịch phát thải [5, 6, 9].

Bảng 6. Cấu trúc khung Dữ liệu - Quá trình - Năng lượng - KNK - Quyết định [3, 5, 6, 9, 10]

Khối	Nội dung	Chức năng
DATA/Dữ liệu	SCADA, GIS, IoT, đồng hồ điện/nước, quan trắc	Thu nhận và đồng bộ dữ liệu
PROCESS/quá trình	Mạng lưới, bơm, sinh học, sục khí, bùn	Mô tả trạng thái công nghệ
ENERGY/năng lượng	kWh, công suất, SEC, hiệu suất thiết bị	Nhận diện điểm nóng năng lượng
GHG/khí nhà kính	Phát thải trực tiếp, từ điện mua và nguồn gián tiếp khác; CH_4, N_2O, CO_2e, CI	Nhận diện điểm nóng phát thải
DECISION/Quyết định	Benchmark, cảnh báo, dự báo, kịch bản	Khuyến nghị và tối ưu vận hành

4. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ ĐỊNH HƯỚNG TỐI ƯU HÓA VẬN HÀNH

EPA tiếp cận kiểm toán năng lượng trên cơ sở xác lập đường cơ sở và tổ chức dữ liệu có khả năng truy xuất theo thời gian. Các nhóm dữ liệu chính bao gồm lưu lượng xử lý, điện năng tiêu thụ, đặc trưng công trình, công nghệ và mức tiêu thụ năng lượng của các quá trình, thiết bị. Việc kết hợp dữ liệu vận hành với dữ liệu năng lượng cho phép xác định đường cơ sở, tính toán các chỉ số hiệu quả, đối sánh và nhận diện các công đoạn có tiềm năng cải thiện [3, 4]. Cách tiếp cận này cho thấy dữ liệu điện năng cần được phân tách đến các công trình đơn vị hoặc nhóm thiết bị tiêu thụ năng lượng chính, thay vì chỉ sử dụng tổng điện năng của toàn nhà máy.

ENERWATER phát triển phương pháp đánh giá và đối sánh hiệu quả năng lượng cho nhà máy xử lý nước thải trên cơ sở kết hợp dữ liệu về quy mô, công nghệ xử lý, lưu lượng, chất lượng nước đầu vào - đầu ra và tiêu thụ năng lượng [5]. Phương pháp Rapid Audit sử dụng các số liệu vận hành thường quy và hóa đơn năng lượng, trong khi Decision Support (hỗ trợ ra quyết định) yêu cầu đo năng lượng theo quá trình để chẩn đoán và nhận diện điểm nóng năng lượng. Vì vậy, CSDL phục vụ đánh giá hiệu quả năng lượng cần tích hợp đồng thời dữ liệu công nghệ, tải lượng, chất lượng nước và điện năng để SEC và đối sánh phản ánh đúng điều kiện xử lý, thay vì chỉ so sánh đơn thuần theo kWh/m^3.

Các nghiên cứu về bản sao số (Digital Twin) trong xử lý nước thải cho thấy yêu cầu kết hợp dữ liệu vận hành với mô hình và phản hồi [10, 11]. Mô hình cần được hiệu chỉnh, kiểm chứng và cập nhật; dữ liệu cần có nguồn, thời điểm, đơn vị và trạng thái chất lượng. Vì vậy, trí tuệ nhân tạo (AI) và Digital Twin nên được triển khai sau khi hệ thống đo, dữ liệu và mô hình đáp ứng yêu cầu tin cậy; bảng điều khiển giám sát đơn thuần chưa đủ để được coi là bản sao số. Kinh nghiệm của Hiệp hội Nước Quốc tế (IWA) trong ECAM nhấn mạnh việc xây dựng khung dữ liệu và theo dõi hiệu quả giảm phát thải [9].

Các giao diện khảo sát tại Hà Nội và Vĩnh Niệm cho thấy đã có nền tảng giám sát, điều hành tại các điểm minh họa (Hình 2); liên kết dữ liệu năng lượng và KNK [7, 8]. Tuy nhiên, các trường hợp minh họa chưa đủ cơ sở để khái quát mức độ trưởng thành số của các đơn vị quản lý, vận hành hệ thống thoát nước đô thị. Do đó, khi triển khai cần rà soát hạ tầng và dữ liệu hiện có, tận dụng GIS/SCADA, bổ sung đo đếm điện năng tại các phụ tải chính và xác định dữ liệu còn thiếu. Việc kết nối CSDL chuyên ngành với dữ liệu vận hành của doanh nghiệp cần quy định rõ quyền truy cập, tần suất cập nhật và mục đích sử dụng, phù hợp với Thông tư số 69/2026/TT-BXD [12] và Quyết định số 897/QĐ-BXD [13].

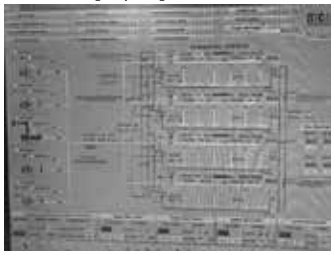
Bảng 7. Kinh nghiệm quản trị dữ liệu ngành nước và định hướng áp dụng [10, 14, 15]

Mô hình	Nền tảng/công cụ	Khai thác dữ liệu	Giá trị vận hành	Định hướng cho Việt Nam
Singapore - PUB	Cảm biến, nền tảng quản lý và dữ liệu vận hành	Tích hợp dữ liệu vận hành; phân tích, dự báo	Giám sát gần thời gian thực; hỗ trợ điều hành	Ưu tiên hạ tầng đo lường, CSDL tích hợp trước AI/Digital Twin
Vương quốc Anh - Ofwat	Chuẩn dữ liệu, dữ liệu mở, nền tảng chia sẻ	Quản trị, chuẩn hóa và tái sử dụng dữ liệu	Minh bạch, đổi mới, nâng hiệu quả toàn ngành	Xây dựng danh mục dùng chung, chuẩn kết nối, phân quyền và an toàn
IWA	Dữ liệu thời gian thực + mô hình/Digital Twin	Hiệu chỉnh, kiểm chứng, mô phỏng trạng thái	Dự báo và hỗ trợ quyết định	Chỉ triển khai mô hình số khi dữ liệu đủ chất lượng và truy xuất được
Việt Nam - kinh nghiệm ngành nước	SCADA, GIS, IoT, quan trắc online, smart meter/thiết bị thông minh, Data Center/SWOC	Đang chuyển từ giám sát riêng lẻ sang tích hợp dữ liệu	Giám sát, điều hành và dịch vụ số; cần đánh giá riêng cho thoát nước	Chuẩn hóa CSDL, kết nối hệ thống, KPI đầu ra; triển khai theo mức độ trưởng thành số

Kinh nghiệm ngành nước trong Bảng 7 được dùng để tham khảo cách tổ chức dữ liệu. Kết quả quản lý cấp nước, như giảm thất thoát hoặc quản lý đồng hồ khách hàng, không phải bằng chứng trực tiếp cho hiệu quả vận hành thoát nước. Khi chuyển giao cần điều chỉnh theo lưu vực, chế độ mưa, mạng cống, xử lý nước thải và bùn. Các ví dụ về quản trị dữ liệu tham khảo [14, 15].



Trung tâm điều hành thoát nước Hà Nội



SCADA vận hành Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm

Hình 2. Giao diện giám sát, điều hành thoát nước tại Hà Nội và Nhà máy XLNT Vĩnh Niệm

Nguồn: Ảnh khảo sát của tác giả tại đơn vị thoát nước Hà Nội và Hải Phòng



Hình 3. Đề xuất kiến trúc tích hợp dữ liệu phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê KNK và hỗ trợ quyết định

5. LỘ TRÌNH ÁP DỤNG TẠI VIỆT NAM

Lộ trình dựa trên nền tảng GIS/SCADA tại các trường hợp khảo sát; định hướng chuyển đổi số đến năm 2030 và quản trị CSDL chuyên ngành [12, 13, 16]; yêu cầu giảm phát thải theo NDC 2022, kế hoạch giảm mê-tan đến năm 2030 và chiến lược khí hậu đến năm 2050 [17, 18, 19]. Với Vĩnh Niệm, ưu tiên thí điểm ở bơm và sục khí: đo điện theo nhóm phụ tải, đồng bộ với lưu lượng, DO, tải lượng và nhật ký vận hành; lập đường cơ sở trước khi điều chỉnh từng giải pháp trong giới hạn công nghệ. Chuỗi dữ liệu trước-sau cần đại diện cho điều kiện vận hành, có xét mùa mưa-khô; không ấn định mức tiết kiệm khi chưa có số liệu.

NDC 2022 đặt mục tiêu giảm phát thải KNK năm 2030 so với kịch bản phát triển thông thường (BAU) là 15,8% bằng nguồn lực trong nước và 43,5% khi có hỗ trợ quốc tế [17, Bảng 3]; Quyết định số 942/QĐ-TTg đặt mục tiêu giảm ít nhất 30% tổng phát thải CH_4 năm 2030 so với năm 2020 trong các lĩnh vực được xác định [18]. Đây là các mục tiêu quốc gia với cơ sở so sánh khác nhau; không áp dụng trực tiếp tỷ lệ này cho từng nhà máy hoặc riêng lĩnh vực thoát nước. Mục tiêu phát thải ròng bằng 0 năm 2050 là định hướng quốc gia để xây dựng phương án dài hạn [19]. Trên cơ sở các Quyết định, mục tiêu đặt ra, đề xuất lộ trình xây dựng chuẩn hóa CSDL - kết nối - phân tích - giải pháp (Hình 4).



Hình 4. Lộ trình đề xuất từ dữ liệu đến giải pháp vận hành thông minh giai đoạn 2026 - 2035, định hướng đến năm 2050

Bảng 8. Đề xuất các nhiệm vụ, sản phẩm và điều kiện triển khai theo năm cấp độ

Cấp độ và thời gian đề xuất	Nhiệm vụ ưu tiên	Sản phẩm kiểm chứng	Chủ trì và điều kiện chuyển cấp
1. Chuẩn hóa 2026 - 2027	Rà soát GIS/SCADA; mã công trình, điểm đo; đo điện và lưu lượng; kế hoạch QA/QC	Danh mục tài sản; bộ dữ liệu có nguồn, đơn vị, thời gian; danh sách khoảng trống	Đơn vị vận hành; thống nhất ranh giới, trách nhiệm và quy tắc dữ liệu
2. Kết nối 2027 - 2028	Liên kết SCADA–GIS–CSDL; đồng bộ thời gian; phân quyền, sao lưu	Lịch sử dữ liệu; đánh giá độ tin cậy dữ liệu; giao diện chia sẻ, nhật ký truy cập	Đơn vị vận hành và đơn vị công nghệ; dữ liệu ghép nối, truy xuất và đối soát được
3. Phân tích 2028 - 2030	Lập đường cơ sở; SEC, Cl, tải lượng; kiểm kê CH_4/N_2O; đối sánh theo điều kiện	Báo cáo kiểm toán/kiểm kê; điểm nóng; độ nhạy và độ không chắc chắn	Đơn vị vận hành, tư vấn nghiên cứu; đủ dữ liệu đại diện mùa và kết quả tính tái lập
4. Tối ưu 2029 - 2035	Thí điểm DO/VFD, lịch bơm, quản lý bùn và CH_4; đánh giá kỹ thuật, kinh tế	Đối chiếu trước–sau; điện, KNK, chi phí và chất lượng xử lý; hồ sơ MRV	Đơn vị vận hành, chủ đầu tư; kiểm chứng hiệu quả và bảo đảm giới hạn công nghệ
5. Thông minh Thí điểm từ sau 2032; mở rộng đến 2050	AI, dự báo, bản sao số (Digital Twin) tại nơi đủ điều kiện; mở rộng giải pháp đã kiểm chứng	Mô hình kiểm chứng; hỗ trợ quyết định; cơ chế giám sát, can thiệp và khôi phục	Đơn vị vận hành và đơn vị mô hình; có dữ liệu tin cậy, năng lực nhân sự, kinh phí duy trì

Hình 4 và Bảng 8 là lộ trình đề xuất; các bước có thể triển khai sớm hoặc song song tại nơi đủ điều kiện, từ công trình, lưu vực đến đơn vị, đô thị và liên thông chuyên ngành. Cơ quan quản lý thống nhất danh mục, yêu cầu chia sẻ; đơn vị vận hành và chủ đầu tư bảo đảm nhân lực, đo đếm, hiệu chuẩn, lưu trữ và kinh phí duy trì. Kiểm chứng thí điểm theo bốn nhóm tiêu chí: (i) điện tổng, điện theo phụ tải và SEC; (ii) phát thải trực tiếp, từ điện mua, tổng KNK và CI; (iii) chất lượng nước sau xử lý so với yêu cầu áp dụng; (iv) độ đầy đủ, sai lệch và độ không chắc chắn của dữ liệu, kết quả. Khi chưa đo trực tiếp CH_4, N_2O, phải nêu phương pháp ước tính, nguồn hệ số và giới hạn xác nhận mức giảm tổng KNK. Nghiên cứu đề xuất khung dữ liệu và bước thí điểm, chưa kiểm chứng hiệu quả của toàn bộ vòng điều khiển tích hợp.

6. KẾT LUẬN

Trong bối cảnh Luật Khoa học, Công nghệ và Đổi mới sáng tạo đã được ban hành cùng với văn bản quy phạm pháp luật hướng dẫn phù hợp các định hướng chủ trương về chuyển đổi số của Trung ương đang tạo hành lang pháp lý thúc đẩy ứng dụng khoa học, công nghệ và dữ liệu số trong các ngành, lĩnh vực. Do vậy việc hoàn thiện cơ sở pháp lý về chuyển đổi số ngành cấp, thoát nước, xây dựng chuẩn hóa CSDL cần được tiếp tục nghiên cứu hoàn chỉnh. Bài báo đề xuất khung Dữ liệu - Quá trình - Năng lượng - KNK - Quyết định, bảng dữ liệu đầu vào và lộ trình năm cấp độ phục vụ kiểm toán năng lượng, kiểm kê KNK và hỗ trợ tối ưu vận hành thoát nước đô thị. Việc triển khai cần gắn trách nhiệm của đơn vị vận hành, chủ đầu tư, cơ quan quản lý và đơn vị nghiên cứu; kết nối CSDL chuyên ngành theo, góp phần thực hiện mục tiêu chuyển đổi số và giảm phát thải quốc gia. Hiệu quả cụ thể cần được xác nhận bằng số liệu, chất lượng dịch vụ và an toàn vận hành.

Lời cảm ơn: Trân trọng cảm ơn GS.TS Nguyễn Việt Anh, đơn vị quản lý vận hành hệ đã hỗ trợ cung cấp số liệu, khảo sát hiện trường và trao đổi phục vụ nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2024 về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia, 2024.

[2] Lê Thu Thủy, Bùi Du Dương, Lê Phương Anh và Nguyễn Việt Anh. Quản trị nước thông minh: kinh nghiệm quốc tế và ứng dụng cho Việt Nam. Tạp chí Cấp thoát nước, tr. 82-89, số 6(134), 2020.

[3] U.S. Environmental Protection Agency. Energy Use Assessment at Water and Wastewater Systems. Internet: https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/energy-use-assessment-water-and-wastewater-systems (accessed: 7/2026).

[4] U.S. Environmental Protection Agency. Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities: A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs, May 2013. Internet: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/wastewater-guide.pdf.

[5] European Commission. Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of wastewater treatment plants. ENERWATER, Project 649819, final reporting, 2018, doi: 10.3030/649819.

[6] IPCC. Wastewater Treatment and Discharge, in 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 5, ch. 6, 2019. Internet: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Ch06_Wastewater.pdf (accessed: 7/2026).

[7] Lê Thu Thủy, Lê Phương Anh và Trần Hồng Minh. Sử dụng hiệu quả năng lượng và giảm phát thải khí nhà kính tại các nhà máy xử lý nước thải: Thực trạng và giải pháp. Tạp chí Xây dựng, số 12, tr. 120-125, 2025.

[8] Lê Thu Thủy, Nguyễn Việt Anh và Nguyễn Văn Quốc. Kiểm toán khí nhà kính trong hệ thống thoát nước đô thị: Nghiên cứu điển hình lưu vực Lê Chân và Nhà máy Xử lý nước thải Vĩnh Niệm, Hải Phòng. Tạp chí Xây dựng, số 6, tr. 190-195, 2026.

[9] B. E. Silva, C. Cabral, S. Rosenfeldt, A. Veizaga, M. Kerres and D. Moskopp, ECAM Methodology Guide. WaCCliM, Sep. 2022. Internet: https://climatesmartwater.org/wp-content/uploads/2022/11/MethodologyGuide_FinalVersion.pdf (accessed: 7/2026).

[10] A.-J. Wang, H. Li, Z. He, Y. Tao, H. Wang, M. Yang, D. Savic, G. T. Daigger, et al. Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review. Engineering, vol. 36, pp. 21-35, 2024, doi: 10.1016/j.eng.2024.04.012.

[11] N. S. R. Nikou, L. Gill and M. R. Ghaani. Digital twins in wastewater treatment: A review of multiscale applications for process optimization, resource recovery and policy compliance. Journal of Water Process Engineering, vol. 90, Art. 110352, 2026, doi: 10.1016/j.jwpe.2026.110352.

[12] Bộ Xây dựng. Thông tư số 69/2026/TT-BXD ngày 15/9/2026 quy định về Hệ thống thông tin. Cơ sở dữ liệu cấp nước sạch và thoát nước đô thị, 2026.

[13] Bộ Xây dựng. Quyết định số 897/QĐ-BXD ngày 09/6/2026 ban hành Quy chế tạm thời quản lý, vận hành, khai thác và bảo đảm an ninh mạng Hệ thống cơ sở dữ liệu cấp nước sạch và thoát nước đô thị, 2026.

[14] Ofwat, H_2Open - Open data in the water industry: A case for change, 2021. Internet: https://www.ofwat.gov.uk/wp-content/uploads/2021/10/H2Open-2.pdf. (accessed: 7/2026).

[15] PUB. Digitalising Water - Sharing Singapore's Experience. IWA Publishing, 2020. Internet: https://iwaponline.com/ebooks/book/806/Digitalising-Water-Sharing-Singapore-s-Experience (accessed: 7/2026).

[16] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 749/QĐ-TTg ngày 03/6/2020 phê duyệt Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030, 2020.

[17] Viet Nam. Nationally Determined Contribution, 2022 update, 2022, Table 3. Internet: https://unfccc.int/node/622542 (accessed: 7/2026).

[18] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 942/QĐ-TTg ngày 05/8/2022 phê duyệt Kế hoạch hành động giảm phát thải khí mê-tan đến năm 2030, 2022.

[19] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 896/QĐ-TTg ngày 26/7/2022 phê duyệt Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu giai đoạn đến năm 2050, 2022.

■Ngày nhận bài: 21/9/2026 ■Ngày sửa bài: 30/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/10/2026

Đề xuất khung lựa chọn tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ khu vực chức năng khi xác định cao độ xây dựng trong quy hoạch đô thị

A proposed framework for selecting design annual exceedance probabilities by functional-area protection level in determining flood planning levels in urban planning

VŨ HOÀNG ĐIỆP*, ĐINH THỊ THU HOÀI
Khoa Hạ tầng đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
*Email: diepvh@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Cao độ xây dựng (H_{XD}) là cao độ nền khống chế tối thiểu nhằm hạn chế nguy cơ ngập, được xác định từ mực nước thiết kế và chiều cao an toàn. QCVN 01:2026/BXD đã phân biệt chu kỳ lặp lại theo loại đô thị và một số nhóm khu vực chức năng; tuy nhiên, việc lựa chọn tần suất có thể chưa phản ánh đầy đủ khác biệt về hậu quả ngập, tính thiết yếu và chức năng sử dụng đất giữa các khu vực trong cùng đô thị. Trên cơ sở QCVN 01:2026/BXD, nguyên tắc quản lý rủi ro ngập và kinh nghiệm quốc tế, bài báo đề xuất khung tham khảo lựa chọn tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ khu vực chức năng. Khung gồm năm nhóm mức độ bảo vệ tham chiếu, ký hiệu BV1-BV5, tương ứng với xác suất vượt hằng năm (Annual Exceedance Probability - AEP) 0,5%; 1%; 2%; 5% và 10%. Ngoài thang này, BV6 được quy ước cho không gian trữ, truyền và thoát nước, không áp dụng mục tiêu loại trừ ngập. Chiều cao an toàn trước hết phải tuân thủ quy chuẩn và quy định chuyên ngành; độ không chắc chắn còn lại của căn cứ xác định mực nước thiết kế là cơ sở bổ sung dữ liệu, phân tích sâu hơn hoặc luận chứng dự phòng. Khung không thay thế tính toán thủy văn - thủy lực chuyên sâu và cần được kiểm chứng qua nghiên cứu tình huống.

Từ khóa: Cao độ xây dựng; tần suất thiết kế; khu vực chức năng; mức độ bảo vệ; quy hoạch đô thị.

ABSTRACT

Flood Planning Level (FPL), a reference concept for the minimum ground or platform level of urban development areas, is determined from a design water level and safety freeboard. QCVN 01:2026/BXD differentiates return periods by urban class and several functional-area groups; however, frequency selection may not fully reflect differences in flood consequences, criticality, and land-use functions within the same urban area. Based on QCVN 01:2026/BXD, flood-risk management principles, and international practice, this paper proposes a reference framework for selecting annual exceedance probability (AEP) according to functional-area protection level. Five reference protection-level groups, denoted BV1-BV5, correspond to AEPs of 0.5%, 1%, 2%, 5%, and 10%. BV6 lies outside this scale and covers water-storage, conveyance, and drainage spaces where flood exclusion is not the primary objective. Freeboard must comply with applicable regulations; residual uncertainty in the basis for determining the design water level may require additional data, deeper analysis, or separately justified allowance. The framework does not replace detailed hydrological-hydraulic analysis and requires case-study validation.

Keywords: Flood planning level; annual exceedance probability; functional area; protection level; urban planning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cao độ xây dựng (H_{XD}) là cao độ thấp nhất cho phép của bề mặt khu đất xây dựng nhằm bảo đảm chống ngập [1]. Đây là chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật quan trọng trong quy hoạch đô thị. Trong nghiên cứu này, Flood Planning Level (FPL) được sử dụng như khái niệm tham chiếu để nhấn mạnh H_{XD} là ngưỡng cao độ chống ngập tối thiểu ở cấp quy hoạch, không đồng nhất với cao độ hoàn thiện công trình.

H_{XD} được xác định từ mực nước thiết kế do mưa, lũ, thủy triều hoặc tổ hợp nguyên nhân gây ngập và một khoảng an toàn. Do các hiện tượng thủy văn có tính ngẫu nhiên, mực nước thiết kế phải gắn với tần suất hoặc chu kỳ lặp lại. Tần suất nhỏ làm tăng mức bảo vệ và yêu cầu cao độ; tần suất lớn làm tăng khả năng ngập vượt thiết kế. Vì vậy, lựa chọn tần suất cần gắn với hậu quả ngập và yêu cầu bảo vệ của khu vực.

QCVN 01:2026/BXD gắn một số yêu cầu về tần suất thiết kế với loại đô thị [2], trong khi việc phân loại đô thị được xác định theo hệ thống tiêu chí riêng [3]. Do đó, khi phân loại đô thị thay đổi, nền đất, nền đường và hạ tầng đã đầu tư không nhất thiết có thể điều chỉnh đồng bộ.

Chiều cao an toàn cần được phân biệt với tần suất thiết kế. Tần suất phản ánh mức độ bảo vệ trước sự kiện ngập, còn chiều cao an toàn là phần dự phòng sau khi xác định mực nước thiết kế và trước hết phải đáp ứng quy chuẩn, quy định chuyên ngành. Độ không chắc chắn còn lại của dữ liệu, phương pháp hoặc phạm vi đại diện có thể là căn cứ để bổ sung dữ liệu, phân tích sâu hơn hoặc luận chứng dự phòng, nhưng không tự động chuyển đổi giữa 0,30 m và 0,50 m của QCVN 01:2026/BXD.

Theo khung thuật ngữ của Liên Hợp Quốc, rủi ro thiên tai gắn với hiểm họa, mức độ phơi bày và tính dễ bị tổn thương [4]; Chỉ thị Lũ của Liên minh châu Âu xem xét đồng thời xác suất xảy ra và hậu quả bất lợi tiềm tàng [5]. Hướng dẫn của Anh phân biệt mức độ dễ bị tổn thương của các loại hình phát triển [6]; các nghiên cứu khác xem xét phân biệt mức bảo vệ theo không gian [7] và theo hậu quả, rủi ro, chi phí bảo vệ [8]. Quy hoạch không gian và sử dụng đất cũng được sử dụng để kiểm soát rủi ro theo đặc điểm khu vực và khả năng chấp nhận ngập [9, 10, 11].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất khung tham khảo lựa chọn tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ khu vực chức năng và xem xét chiều cao an toàn theo quy định áp dụng. Điểm mới không nằm ở việc đưa khu chức năng vào lựa chọn tần suất, mà ở việc tổ chức chúng thành nhóm mức độ bảo vệ tham chiếu và liên kết với AEP khi xác định H_{XD}. Khung hỗ trợ quá trình lập quy hoạch, không thay thế phân tích thủy văn - thủy lực.

2. CƠ SỞ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khung khái niệm xác định cao độ xây dựng

Đơn vị lựa chọn mức độ bảo vệ là khu vực chức năng, xét theo sử dụng đất, địa hình - thoát nước, quy mô chịu ảnh hưởng, công trình thiết yếu, hậu quả ngập, khả năng phục hồi và vai trò trữ - thoát nước. Một khu chức năng có thể chia thành các mức bảo vệ khác nhau nếu địa hình hoặc hậu quả ngập khác nhau; ngược lại, các chức năng khác nhau có thể cùng mức bảo vệ nếu hậu quả và yêu cầu duy trì hoạt động tương đương.

Trong nghiên cứu này, tần suất thiết kế được biểu thị bằng xác suất vượt hằng năm (Annual Exceedance Probability - AEP), ký hiệu p.

Khung đề xuất tách hai quyết định: tần suất thiết kế p_i được lựa chọn theo mức độ bảo vệ của khu vực chức năng; chiều cao an toàn a_i được xem xét sau khi xác định mực nước thiết kế và trên cơ sở quy định áp dụng, đồng thời xét mức độ đầy đủ và khả năng kiểm chứng của căn cứ kỹ thuật. Về cấu trúc, quan hệ xác định cao độ xây dựng được biểu diễn như sau:

$$H_{XD,i} = H_{TK,i} + a_i \quad (1)$$

Trong đó $H_{XD,i}$ là cao độ xây dựng; $H_{TK,i}$ là mực nước thiết kế; a_i là chiều cao an toàn. Ngoài công thức (1), p_i là xác suất vượt hằng năm (AEP); S_i là tổ hợp nguyên nhân và kịch bản ngập; t là thời hạn quy hoạch; Q_i biểu thị chất lượng và khả năng kiểm chứng của căn cứ xác định mực nước thiết kế. Các yếu tố p_i, S_i và t được xem xét khi lựa chọn hoặc xác định $H_{TK,i}$; Q_i được dùng để đánh giá mức độ tin cậy của căn cứ kỹ thuật. Biến đổi khí hậu, nước biển dâng, đô thị hóa và thay đổi sử dụng đất nếu đã được đưa vào $H_{TK,i}$ thì không cộng lặp vào chiều cao an toàn.

2.2. Cơ sở lựa chọn tần suất và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng hợp, phân tích và so sánh. Các yêu cầu của QCVN 01:2026/BXD [2] được đối chiếu với nguyên tắc quản lý rủi ro thiên tai và lũ [4, 5]. Kinh nghiệm về phân biệt mức bảo vệ được tham khảo từ các hướng dẫn và nghiên cứu quốc tế [6, 7, 8], trong khi vai trò của quy hoạch không gian và sử dụng đất trong quản lý rủi ro được đối chiếu với các nguồn [9, 10, 11]. Trên cơ sở đó, tác giả xây dựng bộ tiêu chí, phân nhóm mức độ bảo vệ, đề xuất dãy tần suất và nguyên tắc xem xét chiều cao an toàn.

Dãy AEP 0,5% - 1% - 2% - 5% - 10% được lựa chọn theo ba nguyên tắc: kế thừa các mốc 1%, 2% và 10% đã có điểm đối chiếu trong QCVN 01:2026/BXD [2]; bổ sung mốc 0,5%, là một mức AEP được sử dụng đối với ngập do biển trong hướng dẫn quy hoạch về rủi ro lũ của Anh [6], và mốc 5%, là một trong các mức AEP được sử dụng để mô tả khả năng xảy ra lũ trong hướng dẫn của New South Wales, Australia [11]; và giới hạn số nhóm để thuận tiện khi áp dụng trong quy hoạch. AEP là xác suất vượt trong một năm, không phải cam kết không ngập trong toàn thời hạn quy hoạch. Nghiên cứu không khẳng định năm nhóm là số lượng tối ưu. Dãy gán cho BV1-BV5 là tham chiếu theo mức bảo vệ giảm dần, không phải ngưỡng tối ưu đã hiệu chỉnh thực nghiệm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Nguyên tắc phân nhóm mức độ bảo vệ

Việc phân nhóm mức độ bảo vệ tuân theo năm nguyên tắc: (i) căn cứ chính là hậu quả ngập và tính thiết yếu; (ii) mức bảo vệ gắn với phạm vi chịu ảnh hưởng; (iii) mức bảo vệ cao tương ứng với AEP nhỏ; (iv) khu hiện hữu phải xét khả năng cải tạo, chênh cao và nguy cơ chuyển ngập; (v) không gian trữ, truyền hoặc thoát nước được quản lý theo vai trò thủy lực, không nhầm loại trừ ngập.

Các tiêu chí xem xét gồm: chức năng sử dụng đất; hậu quả đối với con người, tài sản, môi trường và dịch vụ; quy mô ảnh hưởng; tính thiết yếu; khả năng phục hồi; vai trò trữ - truyền - thoát nước; hiện trạng và khả năng thực hiện. Chức năng sử dụng đất xác lập nhóm tham chiếu; các tiêu chí còn lại dùng để điều chỉnh, trong đó vai trò thủy lực còn nhận diện BV6. Các tiêu chí được đánh giá tổng hợp, không cấu thành hệ điểm hay trọng số cố định. Khi các tiêu chí dẫn đến mức bảo vệ khác nhau, an toàn con người, tính thiết yếu và khả năng duy trì chức năng được ưu tiên. Điều kiện hiện hữu và khả thi chủ yếu định hướng giải pháp và kiểm tra tác động hệ thống.

Quy trình lựa chọn gồm hai bước. Bước 1, đối chiếu chức năng sử dụng đất chủ yếu với Bảng 1 để xác định nhóm tham chiếu, phù hợp với hệ thống phân loại đất quy hoạch [12, 17]. Bước 2, xem xét điều chỉnh theo điều kiện địa phương. Mức điều chỉnh phải được luận chứng theo hậu quả ngập, tính thiết yếu, quy mô ảnh hưởng, khả năng phục hồi và điều kiện thực hiện; nghiên cứu không ấn định số bậc điều chỉnh. Đối với khu vực nhiều chức năng, xếp nhóm theo chức năng chi phối và xem xét đối tượng có hậu quả ngập lớn hơn hoặc yêu cầu duy trì hoạt động cao hơn. Với khu hiện hữu, tăng mức bảo vệ không đồng nghĩa với tôn nền đồng loạt và phải kiểm tra nguy cơ chuyển ngập.

3.2. Khung tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ

Bảng 1 là công cụ tra cứu nhóm mức độ bảo vệ tham chiếu theo chức năng sử dụng đất. Dãy BV1-BV5 phản ánh mức giảm dần của yêu cầu bảo vệ; BV6 nằm ngoài thang chống ngập, dành cho không gian duy trì chức năng thủy lực. Công trình có yêu cầu đặc biệt vẫn phải đối chiếu quy định chuyên ngành. Các mô tả trong Bảng 1 dùng để phân nhóm tham chiếu, không phải ngưỡng định lượng cố định; việc định lượng cần hiệu chỉnh theo điều kiện từng đô thị.

Bảng 1. Khung tham khảo mức độ bảo vệ và tần suất thiết kế theo chức năng sử dụng đất

Nhóm mức độ bảo vệ	Đối tượng tham chiếu	Yêu cầu bảo vệ	AEP/chu kỳ tham chiếu
BV1	Hạ tầng đầu mối cấp đô thị; trung tâm chỉ huy phòng chống thiên tai, cứu nạn; công trình an ninh, quốc phòng có yêu cầu duy trì hoạt động liên tục.	Duy trì vận hành hoặc khôi phục rất nhanh; đối chiếu quy định chuyên ngành.	0,5% / 200 năm
BV2	Cơ sở y tế cần duy trì hoạt động/tiếp cận; điểm sơ tán, trú ẩn; hạ tầng quan trọng; khu dân cư tập trung cao; khu công nghiệp có nguy cơ môi trường.	Duy trì hoạt động và tiếp cận.	1% / 100 năm
BV3	Khu phát triển mới có mật độ dân cư, tài sản và hoạt động kinh tế tương đối cao: khu ở mới, hỗn hợp, trung tâm dịch vụ - thương mại, giáo dục thông thường, công nghiệp không có nguy cơ đặc biệt.	Hạn chế thiệt hại lớn.	2% / 50 năm
BV4	Khu hiện hữu, cải tạo; khu công cộng và hạ tầng không trọng yếu có thể chấp nhận ngập ở mức nhất định nhưng cần bảo đảm tiếp cận và phục hồi.	Kiểm soát ngập và phục hồi.	5% / 20 năm
BV5	Cây xanh, công viên, đất nông nghiệp, đất chưa sử dụng và các khu vực có thể chấp nhận ngập có kiểm soát với hậu quả trực tiếp thấp.	Bảo vệ tài sản cơ bản, kiểm soát độ sâu và thời gian ngập.	10% / 10 năm
BV6*	Không gian trữ, truyền và thoát nước.	Duy trì chức năng thủy lực.	Không gán AEP chống ngập

**BV6 nằm ngoài thang BV1-BV5; mục tiêu là duy trì hoặc phục hồi chức năng trữ, truyền, điều tiết và tiêu thoát nước.*

Mốc 1% và 2% tương ứng chu kỳ 100 và 50 năm, phù hợp QCVN 01:2026/BXD [2]. Mốc 0,5% được tham khảo vì đây là một mức AEP được sử dụng đối với ngập do biển trong hướng dẫn quy hoạch về rủi ro lũ của Anh [6]. Mốc 5%, tương ứng chu kỳ 20 năm, là một trong các mức AEP được sử dụng để mô tả khả năng xảy ra lũ trong hướng dẫn của New South Wales, Australia [11]. Mốc 10% dành cho nhóm có thể chấp nhận ngập có kiểm soát và hậu quả trực tiếp thấp. Lựa chọn AEP theo chức năng là lớp thông tin bổ sung; QCVN 01:2026/BXD phải được tuân thủ khi có hiệu lực từ 01/01/2027.

3.3. Căn cứ xác định mực nước thiết kế và chiều cao an toàn

Mực nước thiết kế phục vụ xác định H_{XD} cần được lựa chọn từ nguồn phù hợp với cơ chế ngập, phạm vi, tỷ lệ và thời hạn đồ án, như số liệu quan trắc; quy hoạch thủy lợi, phòng chống thiên tai, lưu vực sông hoặc thoát nước; bản đồ nguy cơ ngập; dấu vết ngập lịch sử; kết quả nghiên cứu, mô hình và khảo sát chuyên môn. Hai hướng dẫn kỹ thuật được tham chiếu là Australian Rainfall and Runoff của Australia về ước lượng lũ thiết kế [13] và Bulletin 17C của Hoa Kỳ về phân tích tần suất lũ [14]; cả hai nhấn mạnh chất lượng dữ liệu, phương pháp phân tích và độ không chắc chắn. Khi dữ liệu hiện có còn hạn chế, đồ án cần nêu rõ nguồn, phạm vi đại diện, cơ chế ngập và yêu cầu kiểm tra tiếp theo.

Khi các nguồn và kết quả hiện có phù hợp với cơ chế ngập, phạm vi và tỷ lệ đồ án, quy hoạch không nhất thiết phải xây dựng mới mô hình thủy văn - thủy lực. Tuy nhiên, với cơ chế ngập phức tạp, khu vực trọng yếu, ngập tổ hợp hoặc trường hợp san nền có thể làm thay đổi đáng kể hướng và dung tích thoát nước, cần nghiên cứu chuyên sâu. Với ngập do nhiều cơ chế như mưa, lũ sông, triều và nước dâng, các thành phần không nên cộng cơ học theo cùng một tần suất; cần nhận diện cơ chế chi phối và kiểm tra tổ hợp khi cần.

Xác định H_{TK} cần dữ liệu phù hợp và tham khảo phương pháp tính thủy văn thiết kế trong phạm vi áp dụng [14, 15]. Độ không chắc chắn của mực nước lũ cần được nhận diện khi xem xét phần dự phòng [16].

Bảng 2. Khung tham khảo xem xét mức độ tin cậy của căn cứ xác định mực nước thiết kế

Tình trạng căn cứ	Đặc điểm căn cứ xác định H_{TK}	Định hướng xử lý
Rõ và có thể kiểm chứng	Nguồn gốc rõ ràng, phạm vi áp dụng phù hợp, có khả năng kiểm chứng.	Xác định a theo quy định áp dụng và căn cứ chuyên ngành.
Chưa đầy đủ	Còn thiếu thông tin về dữ liệu, cơ chế ngập, điều kiện biên hoặc khả năng đại diện.	Bổ sung, đối chiếu trước khi chốt H_{TK} và a.
Hạn chế hoặc độ không chắc chắn cao	Căn cứ hạn chế, mức độ không chắc chắn cao.	Yêu cầu phân tích sâu hơn; nếu cần tăng dự phòng phải có luận chứng.

Bảng 2 không quy đổi độ không chắc chắn của căn cứ xác định H_{TK} thành 0,30 m hoặc 0,50 m. Các trị số a cụ thể phải tuân thủ yêu cầu áp dụng và được luận chứng theo điều kiện đồ án. Các yếu tố biến đổi khí hậu, nước biển dâng hoặc đô thị hóa nếu đã được đưa vào H_{TK} thì không cộng lặp vào a; khi căn cứ thủy văn hoặc mô hình được cải thiện ở giai đoạn sau, H_{TK} và a cần được rà soát đồng thời.

3.4. Tích hợp vào đồ án quy hoạch và phạm vi áp dụng

Trình tự áp dụng khung gồm sáu bước: phân vùng khu chức năng; nhận diện hậu quả và cơ chế ngập; gán nhóm BV1-BV5 hoặc nhận diện BV6; chọn AEP và kiểm tra yêu cầu pháp lý; lựa chọn hoặc tham chiếu mực nước thiết kế và đánh giá căn cứ thủy văn; xác định H_{XD} định hướng và kiểm tra tác động đến thoát nước, không gian trữ nước và khu vực lân cận. Mức độ chi tiết của từng bước phải phù hợp với tỷ lệ đồ án.

Ở quy hoạch chung, khung chủ yếu dùng để nhận diện vùng ưu tiên bảo vệ, không gian trữ - truyền - thoát nước, nguyên tắc tần suất và cao độ khống chế định hướng. Quy hoạch phân khu cụ thể hóa theo khu vực hoặc tiểu lưu vực; quy hoạch chi tiết xác định cao

độ san nền, thoát nước và thông số hạ tầng kỹ thuật [17, 18]. Dự án, thiết kế xây dựng cụ thể hóa nội dung và công trình điều tiết theo quy định chuyên ngành. H_{XD} là ngưỡng tối thiểu; cao độ hoàn thiện có thể cao hơn theo yêu cầu thiết kế.

Với BV6, sản phẩm quy hoạch không phải H_{XD} chống ngập mà là yêu cầu duy trì dung tích trữ, hành lang truyền nước, cao độ bờ hoặc tràn, hướng thoát nước và hạn chế san lấp, chia cắt.

Đối với khu hiện hữu, cần kết hợp cao độ với cải thiện thoát nước, bảo vệ công trình, tạo dung tích và phân kỳ cải tạo khi tôn nền có nguy cơ gây chênh cao hoặc chuyển ngập.

Giá trị chính của khung là tách bốn nhóm quyết định: mức độ bảo vệ; AEP tham chiếu; căn cứ xác định mực nước thiết kế; và chiều cao an toàn. Cách phân tách này giúp làm rõ cơ sở lựa chọn H_{XD} và tránh đồng nhất chức năng sử dụng đất với độ tin cậy thủy văn. Tuy nhiên, nghiên cứu mới ở mức phương pháp luận; các nhóm mức độ bảo vệ và dãy AEP chưa được hiệu chỉnh từ hàm thiệt hại hoặc dữ liệu thực nghiệm đa đô thị, đồng thời chưa lượng hóa quan hệ giữa mức bảo vệ, chi phí nâng cao độ và thiệt hại tránh được. Cần thử nghiệm ở các đô thị có điều kiện ngập khác nhau trước khi áp dụng rộng rãi.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đề xuất khung tham khảo lựa chọn tần suất thiết kế theo mức độ bảo vệ khu vực chức năng khi xác định cao độ xây dựng trong quy hoạch đô thị. Năm nhóm mức độ bảo vệ tham chiếu BV1-BV5 tương ứng AEP 0,5%; 1%; 2%; 5% và 10%; BV6 dành cho không gian trữ, truyền và thoát nước, không áp dụng mục tiêu loại trừ ngập. Cách tiếp cận này bổ sung hậu quả ngập, tính thiết yếu và khả năng chấp nhận ngập bên cạnh phân loại đô thị.

Chiều cao an toàn được xem xét sau khi xác định mực nước thiết kế và theo quy định áp dụng. Hai trị số 0,30 m và 0,50 m trong QCVN 01:2026/BXD được giữ đúng phạm vi đối với công trình trọng yếu, không dùng như hai mức thay thế nhau theo độ không chắc chắn. Khi căn cứ xác định mực nước thiết kế còn hạn chế, cần bổ sung dữ liệu, phân tích sâu hơn hoặc luận chứng dự phòng. Khung không thay thế nghiên cứu thủy văn - thủy lực chuyên sâu và cần được kiểm chứng qua nghiên cứu tình huống trước khi xem xét thể chế hóa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vũ Hoàng Điệp (chủ biên), Nguyễn Thị Lan Anh, Chu Văn Hoàng, Đinh Thị Thu Hoài, Nguyễn Hữu Phú, Trần Quang Huy và Nguyễn Thị Ngọc Uyên. Chuẩn bị kỹ thuật khu đất xây dựng đô thị - Phần 1, Hà Nội: NXB. Xây dựng, 2024.

[2] Bộ Xây dựng. QCVN 01:2026/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch đô thị và nông thôn. Ban hành kèm Thông tư số 46/2026/TT-BXD ngày 30/6/2026, hiệu lực từ ngày 01/01/2027.

[3] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH 15 về phân loại đô thị. Thông qua ngày 24/12/2025, hiệu lực từ ngày 01/01/2026.

[4] United Nations General Assembly. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. A/71/644, 2016.

[5] European Parliament and Council of the European Union. Directive 2007/60/EC of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union, L 288, pp. 27-34, 2007.

[6] Ministry of Housing, Communities and Local Government. Flood risk and coastal change. Planning Practice Guidance, updated 2025. Internet: https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-and-coastal-change (accessed: 9/2026).

[7] T. Hartmann and T. Spit. Legitimizing differentiated flood protection levels - Consequences of the European flood risk management plan. Environmental Science & Policy, vol. 55, Part 2, pp. 361-367, 2016, doi: 10.1016/j.envsci.2015.08.013.

[8] S. N. Jonkman, M. Kok, M. van Ledden and J. K. Vrijling. Risk-based design of flood defence systems: a preliminary analysis of the optimal protection level for the New Orleans metropolitan area. Journal of Flood Risk Management, vol. 2, no. 3, pp. 170-181, 2009, doi: 10.1111/j.1753-318X.2009.01036.x.

[9] A. Mustafa, M. Bruwier, P. Archambeau, S. Erpicum, M. Pirotton, B. Dewals and J. Teller. Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments. Journal of Environmental Management, vol. 225, pp. 193-204, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.07.090.

[10] Hawkesbury-Nepean Floodplain Management Steering Committee. Managing Flood Risk Through Planning Opportunities: Guidance on Land Use Planning in Flood Prone Areas. New South Wales, Australia, June 2006.

[11] New South Wales Department of Planning and Environment. Flood Risk Management Manual: The Management of Flood Liable Land, June 2023.

[12] Bộ Xây dựng. Thông tư số 16/2025/TT-BXD ngày 30/6/2025 quy định chi tiết một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, hiệu lực từ 01/07/2025.

[13] J. Ball, M. Babister, R. Nathan, W. Weeks, E. Weinmann, M. Retallick and I. Testoni, Eds. Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation. Commonwealth of Australia, 2019.

[14] J. F. England Jr., T. A. Cohn, B. A. Faber, J. R. Stedinger, W. O. Thomas Jr., A. G. Veilleux, J. E. Kiang and R. R. Mason Jr. Guidelines for Determining Flood Flow Frequency - Bulletin 17C, ver. 1.1. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. B5, 148 p., 2018, doi: 10.3133/tm4B5.

[15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13615:2022 - Tính toán các đặc trưng thủy văn thiết kế. 2022.

[16] N. Nolde and M. Jakob. Challenging the standard dike freeboard: Methods to quantify statistical uncertainties in river flood protection. Canadian Water Resources Journal, vol. 41, no. 1-2, pp. 151-160, 2016, doi: 10.1080/07011784.2015.1010180.

[17] Bộ Xây dựng. Văn bản hợp nhất số 59/VBHN-BXD ngày 02/07/2026 quy định chi tiết một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn. Internet: https://moc.gov.vn/vn/Pages/ChiTietVanBan.aspx?TypeVB=2&vID=5017 (truy cập: tháng 9/2026).

[18] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 33/VBHN-VPQH ngày 13/03/2026: Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn. Internet: https://datafiles.chinhphu.vn/cpp/files/vbpq/2026/3/33-vbhn-vpqh.pdf (truy cập: tháng 9/2026).

■Ngày nhận bài: 14/9/2026 ■Ngày sửa bài: 24/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 08/10/2026

Quản lý chất lượng cấp nước hướng tới uống nước trực tiếp tại vòi: Thách thức và đề xuất giải pháp

Drinking water quality management towards safe direct tap water consumption: Challenges and proposed solutions

> TS PHẠM NGỌC CHÍNH
Cục Kết cấu hạ tầng xây dựng (Bộ Xây dựng)

TÓM TẮT

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng, biến đổi khí hậu và yêu cầu ngày càng cao về chất lượng dịch vụ cấp nước, quản lý chất lượng nước uống trực tiếp tại vòi đang trở thành yêu cầu đặt ra đối với ngành cấp nước đô thị ở nước ta. Thực tế cho thấy, tỷ lệ dân số đô thị được tiếp cận hệ thống cấp nước tập trung đã không ngừng gia tăng trong những năm gần đây. Tuy nhiên, phần lớn nước cấp hiện nay vẫn được quản lý theo Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt QCVN 01-1:2024/BYT [6] . Trong khi đó, việc cung cấp nước đạt chất lượng để uống trực tiếp tại vòi còn nhiều hạn chế; công cụ giám sát, kiểm tra chưa đầy đủ và các quy định quản lý đối với loại hình cấp nước này cũng chưa được hoàn thiện. Trên cơ sở tổng hợp các quy định pháp luật, kinh nghiệm quốc tế và thực trạng quản lý chất lượng nước hiện nay, bài báo đánh giá sự cần thiết của việc quản lý chất lượng nước uống trực tiếp tại vòi trong hệ thống cấp nước đô thị Việt Nam.

Từ khóa: Nước uống trực tiếp tại vòi; cấp nước đô thị; quản lý cấp nước; cấp nước an toàn.

ABSTRACT

In the context of rapid urbanization, climate change, and increasing demands for improved water supply service quality, the management of drinking water quality directly at the tap is becoming an important requirement for the urban water supply sector in Vietnam. In recent years, the proportion of the urban population with access to centralized water supply systems has steadily increased. However, most supplied water is currently managed in accordance with the National Technical Regulation on Domestic Water Quality QCVN 01-1:2024/BYT [6], while the provision of tap water that meets standards for direct consumption remains limited. In addition, appropriate tools for monitoring and inspection are still lacking, and a comprehensive regulatory framework for the management of drinking water directly from the tap has yet to be fully established. Based on a review of relevant legal regulations, international experience, and the current status of water quality management, this paper assesses the necessity of managing drinking water quality at the tap within Vietnam's urban water supply systems.

Keywords: Directly drinkable tap water; urban water supply; water supply management; safe water supply.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nước uống bảo đảm an toàn là nhu cầu thiết yếu của con người và là một trong những điều kiện quan trọng phản ánh chất lượng dịch vụ cấp nước đô thị. Những năm gần đây, cùng với quá trình đô thị hóa nhanh, tỷ lệ dân cư đô thị được cung cấp nước sạch từ hệ thống tập trung đã đạt khoảng 95%, góp phần cải thiện điều kiện sống và sức khỏe cộng đồng. Mặc dù hầu hết người dân đã được tiếp cận nước sạch, nhưng việc uống nước trực tiếp tại vòi vẫn chưa được phổ biến, người dân vẫn phải đun sôi, sử dụng thiết bị lọc hoặc nước đóng chai, thực trạng này cho thấy vẫn còn khoảng cách giữa việc cung cấp nước sạch sinh hoạt và uống nước trực tiếp tại vòi. Chất lượng nước không chỉ phụ thuộc vào quá trình xử lý tại nhà máy mà còn chịu ảnh hưởng của toàn bộ hệ thống truyền tải và phân phối. Tình trạng đường ống xuống cấp, áp lực mạng lưới không ổn định, nguy cơ tái nhiễm bẩn trong quá trình phân phối nước và thiếu giám sát chất lượng nước tại vòi đang là những thách thức lớn đối với mục tiêu cung cấp nước uống trực tiếp an toàn hiện nay ở nước ta.

Bên cạnh đó, hệ thống pháp luật hiện hành chủ yếu quy định nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, chưa có quy định riêng về nước uống trực tiếp tại vòi. Trách nhiệm quản lý còn phân tán giữa nhiều cơ quan, trong khi việc giám sát chất lượng nước tại vòi, công khai thông tin và bảo vệ quyền

lợi người sử dụng vẫn còn nhiều khoảng trống chưa quy định. Đồng thời, tác động của biến đổi khí hậu, ô nhiễm nguồn nước tiếp tục tạo áp lực đối với hệ thống cấp nước đô thị.

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và hoàn thiện mô hình quản lý nước uống trực tiếp tại vòi là yêu cầu cần thiết nhằm bảo đảm an toàn sức khỏe cộng đồng, nâng cao chất lượng dịch vụ cấp nước và hướng tới phát triển đô thị bền vững, thông minh.

2. KHÁI NIỆM VỀ NƯỚC UỐNG TRỰC TIẾP TẠI VÒI

Nước uống trực tiếp tại vòi không đơn giản là nước có chất lượng tốt tại đầu ra của nhà máy xử lý mà phải được duy trì chất lượng trong toàn bộ quá trình vận chuyển, phân phối và đến thời điểm người sử dụng lấy nước tại vòi. Điều này tạo ra sự khác biệt căn bản giữa việc kiểm soát chất lượng nước tại nhà máy và việc bảo đảm nước uống trực tiếp tại vòi.

Theo cách tiếp cận quốc tế thì Tổ chức Y tế Thế giới (WHO) xem nước uống an toàn là nước có chất lượng bảo đảm sức khỏe con người và được kiểm soát rủi ro từ nguồn nước đến điểm sử dụng cuối cùng.

Bên cạnh đó, nước uống tại vòi (drinking water at the point of use) được hiểu là nước được cung cấp đến điểm sử dụng cuối cùng của người tiêu dùng, đáp ứng các yêu cầu về an toàn và chất lượng nước uống, và có thể được sử dụng trực tiếp để uống tại vòi mà không cần xử lý bổ sung tại hộ gia đình. Khái niệm này phù hợp với cách tiếp cận của WHO về Kế hoạch cấp nước an toàn (Water Safety Plan - WSP), trong đó các nguy cơ đối với an toàn nước được nhận diện và kiểm soát xuyên suốt từ nguồn nước đến người tiêu dùng.

3. THỰC TRẠNG VỀ QUẢN LÝ CHẤT LƯỢNG NƯỚC SẠCH TẠI VIỆT NAM HIỆN NAY

Hiện nay, hệ thống pháp luật về quản lý chất lượng nước sạch và cấp nước đô thị ở Việt Nam đã từng bước được hoàn thiện, tạo cơ sở pháp lý cho hoạt động khai thác, sản xuất, cung cấp và kiểm soát chất lượng nước phục vụ sinh hoạt của người dân. Nhiều văn bản pháp luật quan trọng có liên quan đã được ban hành, trong đó có Luật Tài nguyên nước năm 2023 và các văn bản hướng dẫn thi hành; Nghị định số 117/2007/NĐ-CP [2] về sản xuất, cung cấp và tiêu thụ nước sạch, được sửa đổi, bổ sung bởi Nghị định số 124/2011/NĐ-CP, quy định trách nhiệm của cơ quan quản lý nhà nước và đơn vị cấp nước trong hoạt động sản xuất, cung cấp nước sạch.

Về các quy chuẩn kỹ thuật có liên quan đến chất lượng nước bao gồm QCVN 08:2023/BTNMT [8] về chất lượng nước mặt. Quy chuẩn này dùng để đánh giá, phân loại chất lượng nước mặt nhằm bảo vệ và định hướng mục đích sử dụng nguồn nước. QCVN 09:2023/BTNMT [4] về chất lượng nước dưới đất. Đặc biệt, QCVN 01-1:2024/BYT Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt. Quy chuẩn này thay thế QCVN 01-1:2018/BYT kể từ ngày 01/07/2025, áp dụng đối với các đơn vị cấp nước và hộ gia đình tự khai thác. Quy chuẩn này đã cập nhật các yêu cầu về giới hạn thông số chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, đồng thời quy định trách nhiệm nội kiểm, ngoại kiểm chất lượng nước. Như vậy những quy định tại các quy chuẩn kỹ thuật đã góp phần tăng cường kiểm soát chất lượng nước trong quá trình khai thác nước, sản xuất và phân phối, từng bước nâng cao mức độ an toàn của nước cấp cho người dân.

Trên cơ sở khung pháp lý hiện hành, công tác quản lý chất lượng nước trong hệ thống cấp nước đô thị đã có những chuyển biến tích cực. Nhiều doanh nghiệp cấp nước đã đầu tư nâng cấp công nghệ xử lý, hiện đại hóa hệ thống quan trắc chất lượng nước, xây dựng phòng thí nghiệm đạt chuẩn và ứng dụng hệ thống SCADA trong giám sát quá trình sản xuất, phân phối nước sạch. Công tác kiểm tra chất lượng nước định kỳ được thực hiện theo quy định của Bộ Y tế.



Hình 1. Trụ nước uống trực tiếp tại Tổng Công ty cấp nước Sài Gòn

Bên cạnh đó, phương pháp tiếp cận quản lý rủi ro thông qua Kế hoạch cấp nước an toàn (Water Safety Plan - WSP) đã được giới thiệu và triển khai tại Việt Nam từ năm 2006, từng bước trở thành một công cụ quan trọng trong quản lý an toàn cấp nước đô thị. Việc áp dụng WSP đã góp phần chuyển tư duy quản lý từ kiểm tra chất lượng nước thành phẩm sang nhận diện, đánh giá và kiểm soát các nguy cơ có thể ảnh hưởng đến an toàn nước trong toàn bộ hệ thống cấp nước. Kết quả đánh giá tại một số doanh nghiệp cấp nước cho thấy WSP có tác động tích cực đến chất lượng nước sau xử lý, khả năng ứng phó với các rủi ro và hiệu quả vận hành hệ thống. Tuy nhiên, quá trình triển khai vẫn gặp một số khó khăn do thiếu hướng dẫn kỹ thuật phù hợp với điều kiện thực tế, hạn chế về nguồn lực và sự khác biệt về năng lực quản lý giữa các địa phương, đơn vị cấp nước.

Mặc dù đã đạt được những kết quả nhất định, phạm vi quản lý chất lượng nước hiện nay vẫn chủ yếu tập trung vào nguồn nước, công trình xử lý và mạng lưới phân phối; trong khi chất lượng nước tại điểm sử dụng cuối cùng, đặc biệt là tại vòi nước của hộ gia đình chưa được quản lý một cách đầy đủ và thống nhất. Các quy định hiện hành chưa hình thành một khung pháp lý riêng đối với nước uống trực tiếp tại vòi, trong đó chưa xác định rõ tiêu chí hoặc điều kiện để công nhận một hệ thống cấp nước đủ điều kiện cung cấp nước uống trực tiếp tại vòi; yêu cầu giám sát chất lượng nước tại điểm sử dụng; cơ chế công bố, cung cấp thông tin chất lượng nước cho người sử dụng; cũng như trách nhiệm cụ thể của

đơn vị cấp nước và các chủ thể liên quan đối với chất lượng nước tại điểm sử dụng.

Trong thực tế, chất lượng nước khi đến điểm sử dụng còn có thể chịu tác động bởi nhiều yếu tố sau công đoạn xử lý và phân phối như tình trạng của vật liệu và tuổi thọ đường ống, biến động áp lực, thời gian lưu nước, sự cố trên mạng lưới hoặc các điều kiện của hệ thống cấp nước trong phạm vi công trình của người sử dụng. Do đó, việc kiểm soát chất lượng tại nhà máy và trên mạng lưới, mặc dù cần thiết nhưng chưa đủ để phản ánh mức độ an toàn của nước tại điểm uống trực tiếp.

Từ những khoảng trống nêu trên cho thấy yêu cầu tiếp tục hoàn thiện các quy định về quản lý chất lượng nước theo hướng tiếp cận toàn diện, lấy an toàn nước uống trực tiếp tại điểm sử dụng làm một trong những mục tiêu cuối cùng của chuỗi cấp nước đồng thời tăng cường việc áp dụng WSP theo hướng thống nhất, có khả năng kiểm tra, đánh giá và giám sát hiệu quả. Đây là cơ sở quan trọng để từng bước chuyển từ mô hình kiểm soát chất lượng nước sạch sang mô hình quản lý an toàn nước uống trực tiếp tại vòi nhằm phù hợp với yêu cầu bảo vệ sức khỏe cộng đồng, nâng cao chất lượng dịch vụ cấp nước.

4. NHỮNG THÁCH THỨC TRONG QUẢN LÝ CẤP NƯỚC HƯỚNG TỚI UỐNG NƯỚC TRỰC TIẾP TẠI VÒI

Phát triển nước uống trực tiếp tại vòi ở Việt Nam không chỉ phụ thuộc vào khả năng đáp ứng các yêu cầu về chất lượng nước sau xử lý mà đòi hỏi phải bảo đảm an toàn trong toàn bộ chuỗi cấp nước, từ nguồn nước thô, công trình xử lý, mạng lưới truyền tải và phân phối đến điểm sử dụng cuối cùng. Theo cách tiếp cận quản lý rủi ro, bất kỳ công đoạn nào trong chuỗi này cũng có thể làm suy giảm chất lượng nước và ảnh hưởng đến mức độ an toàn nước tại vòi. Trên cơ sở thực trạng hệ thống cấp nước đô thị và yêu cầu đối với nước uống trực tiếp, có thể nhận diện các nhóm khó khăn, thách thức chủ yếu về hạ tầng, công nghệ, thể chế, chất lượng nguồn nước và quản trị rủi ro như sau;

Thứ nhất, thách thức trong việc duy trì chất lượng nước trên toàn bộ mạng lưới phân phối. Một trong những trở ngại lớn đối với phát triển nước uống trực tiếp tại vòi là khả năng duy trì ổn định chất lượng nước sau khi rời khỏi nhà máy xử lý. Tại nhiều đô thị, một bộ phận mạng lưới cấp nước đã được xây dựng trong thời gian dài, một số tuyến ống có dấu hiệu xuống cấp, rò rỉ. Tình trạng thất thoát nước và biến động áp lực trên mạng lưới không chỉ làm giảm hiệu quả vận hành mà còn có thể làm gia tăng nguy cơ xâm nhập chất ô nhiễm từ môi trường xung quanh. Ngoài mạng lưới cấp nước công cộng, các bể chứa trung gian, hệ thống đường ống bên trong công trình và thiết bị tại điểm sử dụng cũng có thể ảnh hưởng đến chất lượng nước trước khi đến vòi. Đây là thách thức cơ bản đặt ra yêu cầu chuyển từ kiểm soát chất lượng tại các điểm kiểm soát riêng lẻ sang quản lý an toàn nước theo toàn bộ chuỗi cấp nước.

Thứ hai, hạn chế về năng lực giám sát và kiểm soát chất lượng nước theo thời gian thực. Phát triển nước uống trực tiếp tại vòi đòi hỏi hệ thống cấp nước phải phát hiện sớm các biến động bất thường về chất lượng nước và điều kiện vận hành. Tuy nhiên, tại nhiều đơn vị, công tác kiểm soát vẫn chủ yếu dựa vào lấy mẫu và phân tích định kỳ nên khả năng cảnh báo tức thời còn hạn chế. Việc ứng dụng cảm biến trực tuyến, SCADA, IoT, GIS và phân tích dữ liệu chưa đồng đều, trong khi quan trắc tại các điểm cuối mạng lưới còn thiếu. Do đó, cần từng bước xây dựng hệ thống giám sát tích hợp từ nhà máy đến điểm sử dụng, kết hợp quan trắc trực tuyến, kiểm tra định kỳ và phân tích dữ liệu để nâng cao năng lực cảnh báo sớm và phản ứng nhanh đối với các nguy cơ ảnh hưởng đến an toàn nước.

Thứ ba, gia tăng rủi ro do suy giảm chất lượng nguồn nước và biến đổi khí hậu. An toàn nước uống tại vòi phụ thuộc trực tiếp vào chất lượng nguồn nước thô. Tuy nhiên, quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa và gia tăng hoạt động sản xuất, sinh hoạt đang làm tăng áp lực ô nhiễm đối với nguồn nước; đồng thời, biến đổi khí hậu làm gia tăng các hiện tượng hạn hán, lũ lụt, xâm nhập mặn và biến động dòng chảy. Những yếu tố này làm thay đổi cả lưu lượng và chất lượng nước thô, ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý và làm tăng chi phí kiểm soát chất lượng nước. Bên cạnh đó, các chất ô nhiễm mới nổi như dư lượng dược phẩm, kháng sinh, PFAS và vi nhựa cũng đặt ra yêu cầu cao hơn về quan trắc và đánh giá rủi ro.

Thứ tư, thách thức trong chuyển từ kiểm soát chất lượng sang quản lý rủi ro và xây dựng niềm tin của người sử dụng. Nước uống trực tiếp tại vòi không chỉ cần đáp ứng yêu cầu chất lượng mà còn phải được quản lý theo hướng phòng ngừa rủi ro. Điều này đòi hỏi các đơn vị cấp nước chuyển từ kiểm tra chất lượng sau xử lý sang quản lý chủ động theo Kế hoạch cấp nước an toàn (WSP), từ nhận diện nguy cơ, kiểm soát vận hành đến kiểm chứng chất lượng nước. Tuy nhiên, việc triển khai WSP hiện chưa đồng đều giữa các địa phương và đơn vị cấp nước. Bên cạnh đó, niềm tin của người sử dụng phụ thuộc lớn vào tính minh bạch thông tin và khả năng ứng phó sự cố.

Thứ năm, khoảng trống về thể chế, tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật và phân định trách nhiệm quản lý. Khung pháp lý hiện hành chủ yếu điều chỉnh nước sạch sinh hoạt, chưa hình thành đầy đủ các yêu cầu riêng đối với nước uống trực tiếp tại vòi. Một số nội dung như tiêu chí công nhận hệ thống đủ điều kiện, yêu cầu giám sát tại điểm sử dụng, công khai thông tin, cảnh báo sự cố và trách nhiệm khi chất lượng nước suy giảm vẫn cần được hoàn thiện. Đồng thời, an toàn cấp nước liên quan đến nhiều lĩnh vực như tài nguyên nước, y tế, xây dựng, môi trường và vận hành hệ thống, nên cần cơ chế phối hợp liên ngành và phân định trách nhiệm rõ ràng. Việc hoàn thiện thể chế và cơ chế quản trị thống nhất là điều kiện quan trọng để bảo đảm các giải pháp kỹ thuật, giám sát và quản lý rủi ro được triển khai đồng bộ, hiệu quả.

Như vậy, các thách thức đối với phát triển nước uống trực tiếp tại vòi ở Việt Nam có mối liên hệ chặt chẽ và tác động lẫn nhau. Hạn chế về hạ tầng, công nghệ và giám sát làm gia tăng nguy cơ suy giảm chất lượng nước; khoảng trống thể chế gây khó khăn cho kiểm soát và phân định trách nhiệm; trong khi ô nhiễm nguồn nước và biến đổi khí hậu làm gia tăng rủi ro đầu vào. Bên cạnh đó, năng lực quản trị rủi ro và mức độ minh bạch thông tin cũng ảnh hưởng trực tiếp đến niềm tin của người sử dụng.

Vì vậy, phát triển nước uống trực tiếp tại vòi cần được tiếp cận theo hướng quản lý an toàn nước tổng hợp, kết hợp nâng cấp hạ tầng, hiện đại hóa công nghệ xử lý và giám sát, hoàn thiện tiêu chuẩn, quy chuẩn và khung pháp lý, tăng cường quản lý rủi ro theo WSP. Đây là cơ sở để chuyển từ mục tiêu bảo đảm nước sạch đạt quy chuẩn sang bảo đảm nước uống an toàn, ổn định và tin cậy tại điểm sử dụng.

5. ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP QUẢN LÝ CHẤT LƯỢNG CẤP NƯỚC HƯỚNG TỚI UỐNG NƯỚC TRỰC TIẾP TẠI VÒI

Từ thực trạng và thách thức nêu trên, để quản lý chất lượng cấp nước hướng tới uống nước trực tiếp tại vòi, tác giả đề xuất một số giải pháp sau:

(1) Tiếp tục nghiên cứu và hoàn thiện khung pháp lý về nước uống trực tiếp tại vòi, trong đó xác định rõ khái niệm, tiêu chí công nhận, tiêu chuẩn, quy chuẩn yêu cầu kiểm soát chất lượng tại điểm sử dụng, trách nhiệm của các bên có liên quan, cơ chế giám sát và công khai thông tin chất lượng nước. Sớm ban hành quy chuẩn về chất lượng nước uống trực tiếp tại vòi.

(2) Tăng cường và đổi mới quản lý an toàn cấp nước theo phương pháp tiếp cận từ nguồn đến vòi; cập nhật, nâng cấp nội dung Kế hoạch cấp nước an toàn của đơn vị cấp nước, tập trung đánh giá và kiểm soát rủi ro trong quá trình khai thác, xử lý và phân phối nước.

(3) Hiện đại hóa hệ thống giám sát chất lượng nước, kết hợp quan trắc định kỳ với giám sát trực tuyến thông qua SCADA, GIS, IoT tại điểm sử dụng.

(4) Cải tạo, nâng cấp công nghệ xử lý nước và mạng lưới cấp nước theo mức độ rủi ro, tập trung vào các tuyến ống cũ, khu vực có tỷ lệ sự cố và thất thoát cao, áp lực không ổn định.

(5) Nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và ô nhiễm nguồn nước, tăng cường bảo vệ nguồn nước, theo dõi chất lượng nước thô và từng bước nghiên cứu, kiểm soát các rủi ro, nguy cơ đối với nguồn nước thô.

(6) Tăng cường công khai thông tin và xây dựng niềm tin của người sử dụng về tình trạng chất lượng nước; từng bước áp dụng nền tảng số hoặc mã QR để người dân có thể truy xuất thông tin.

Cuối cùng, triển khai theo lộ trình thí điểm - đánh giá - hoàn thiện - nhân rộng, ưu tiên các khu vực có điều kiện thuận lợi về nguồn nước, công nghệ xử lý hiện đại, mạng lưới và năng lực quản lý trước khi mở rộng mô hình trên phạm vi rộng.

6. KẾT LUẬN

Quản lý chất lượng cấp nước hướng tới uống nước trực tiếp tại vòi không chỉ dừng ở việc bảo đảm chất lượng nước sau xử lý mà phải kiểm soát toàn bộ chuỗi cấp nước theo hướng quản lý rủi ro, từ nguồn nước, quá trình xử lý, mạng lưới truyền tải, phân phối đến điểm sử dụng cuối cùng. Đối với Việt Nam, yêu cầu này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh nhiều hệ thống cấp nước đang chịu tác động của ô nhiễm nguồn nước, xâm nhập mặn, già hóa đường ống, thất thoát nước, áp lực mạng lưới không ổn định và biến đổi khí hậu. Vì vậy, việc nghiên cứu và xây dựng khung quản lý chất lượng cấp nước phù hợp với điều kiện Việt Nam là cần thiết nhằm bảo đảm sức khỏe cộng đồng, nâng cao chất lượng dịch vụ cấp nước và từng bước tiệm cận các thông lệ quốc tế về quản lý nước uống an toàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15 ngày 27/11/2023.

[2] Chính phủ. Nghị định số 117/2007/NĐ-CP ngày 11/7/2007 về sản xuất, cung cấp và tiêu thụ nước sạch.

[3] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first, second and third addenda. Geneva: WHO, 2026.

[4] Bộ Tài nguyên và Môi trường. QCVN 09:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước dưới đất, ban hành kèm theo Thông tư số 01/2023/TT-BTNMT ngày 13/3/2023.

[5] Bộ Xây dựng. Thông tư số 08/2012/TT-BXD ngày 21/11/2012 hướng dẫn thực hiện bảo đảm cấp nước an toàn.

[6] Bộ Y tế. QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, ban hành kèm theo Thông tư số 52/2024/TT-BYT ngày 31/12/2024.

[7] Nguyễn Hồng Tiến. Bảo đảm an ninh nguồn nước để an toàn và phát triển bền vững. Báo Nhân Dân, ngày 27/11/2020.

[8] Bộ Tài nguyên và Môi trường. QCVN 08:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt, ban hành kèm theo Thông tư số 01/2023/TT-BTNMT ngày 13/3/2023.

[9] Thạch Thảo. SAWACO nâng cao chất lượng nước hướng đến nước uống trực tiếp tại vòi trên hệ thống cấp nước. SAWACO, ngày 05/8/2025. Internet: https://sawaco.com.vn/post-detail/sawaco-nang-cao-chat-luong-nuoc-huong-den-nuoc-uong-truc-tiep-tai-voi-tren-he-thong-cap-nuoc-250805161904.html (truy cập: tháng 8/2025).

■Ngày nhận bài: 23/8/2026, ■Ngày sửa bài: 30/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng:15/9/2026

So sánh bảy mô hình học máy trong lập bản đồ nguy cơ ngập lụt tỉnh Hà Tĩnh dưới kiểm định chéo theo không gian

Machine learning for flood susceptibility mapping in Ha Tinh province, Vietnam: A seven-model comparison under spatially blocked cross-validation

> NGUYỄN ANH TUẤN*, TRẦN VŨ VĂN HÒA, NGUYỄN DUY HƯNG, NGUYỄN TRỌNG TÂM, PHẠM THỊ ANH, MAI THỊ HẢI HÀ, VŨ THỊ HOÀI THU

Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh; *Email: tuanna@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Bản đồ nguy cơ ngập lụt bằng học máy thường được đánh giá bằng cách chia mẫu ngẫu nhiên, trong khi các ô lưới lân cận gần như trùng thông tin nên chỉ số bị thổi phồng. Nghiên cứu huấn luyện bảy mô hình trên cùng tập mẫu 80.000 ô lưới 30 m cân bằng của tỉnh Hà Tĩnh với 21 biến và cùng bộ fold. Dưới kiểm định chéo theo ô vuông 5 km, XGBoost đạt AUC 0,9660 và Kappa 0,8343, cao hơn mạng nơ-ron tối ưu bằng thuật toán bầy đàn với 0,9610 và 0,8276; tối ưu bầy đàn nâng AUC của mạng nơ-ron từ 0,9546 lên 0,9610 nhưng không đủ để vượt các mô hình cây. Cách chia ngẫu nhiên làm tăng AUC thêm 0,0015 ở hồi quy logistic nhưng tới 0,0084 ở LightGBM, tức lệch 5,6 lần giữa các họ mô hình và đủ để đảo ngôi dẫn đầu. Bản đồ do XGBoost sinh ra xác định 1.038,7 km^2, bằng 17,40% diện tích tỉnh, ở mức nguy cơ cao và rất cao, với tỷ lệ diện tích từng ngập tăng đơn điệu từ 0,1% lên 61,3% qua năm mức.

Bản đồ nguy cơ ngập lụt ứng dụng học máy thường được đánh giá thông qua phương pháp chia mẫu ngẫu nhiên. Tuy nhiên, do các ô lưới lân cận có mức độ tương đồng thông tin cao, phương pháp này có thể khiến các chỉ số đánh giá hiệu năng mô hình cao hơn thực tế. Nghiên cứu huấn luyện bảy mô hình trên cùng tập dữ liệu gồm 80.000 ô lưới 30 m đã được cân bằng, với 21 biến đầu vào và cùng phương án phân chia các tập kiểm định chéo (fold). Trong kiểm định chéo không gian với các ô vuông kích thước 5 km, XGBoost đạt AUC 0,9660 và Kappa 0,8343, cao hơn mạng nơ-ron được tối ưu bằng thuật toán bầy đàn (tương ứng 0,9610 và 0,8276). Thuật toán tối ưu bầy đàn giúp nâng AUC của mạng nơ-ron từ 0,9546 lên 0,9610, nhưng vẫn chưa vượt được các mô hình cây. Đáng chú ý, phương pháp chia mẫu ngẫu nhiên làm tăng AUC thêm 0,0015 đối với hồi quy logistic và 0,0084 đối với LightGBM, tương ứng mức chênh lệch 5,6 lần giữa hai mô hình, đủ để làm thay đổi thứ hạng mô hình có hiệu năng cao nhất. Bản đồ nguy cơ ngập lụt được xây dựng bằng XGBoost xác định 1.038,7 km^2, tương đương 17,40% diện tích tỉnh Hà Tĩnh, thuộc hai mức nguy cơ cao và rất cao. Tỷ lệ diện tích từng bị ngập tăng đơn điệu từ 0,1% lên 61,3% qua năm mức nguy cơ.

Từ khóa: Nguy cơ ngập lụt; kiểm định chéo không gian; XGBoost; tối ưu hoá bầy đàn; Hà Tĩnh.

ABSTRACT

Machine-learning flood susceptibility maps are usually evaluated by random sample splitting, yet neighbouring grid cells carry nearly identical information, so the metrics are inflated. This study trained seven models on the same balanced sample of 80,000 cells on a 30 m grid over Ha Tinh province with 21 predictors and the same folds. Under cross-validation blocked by 5 km squares, XGBoost achieved an AUC of 0.9660 and a Kappa of 0.8343, exceeding the swarm-tuned neural network at 0.9610 and 0.8276; swarm tuning raised the network AUC from 0.9546 to 0.9610 but not enough to overtake the tree ensembles. Random splitting inflated AUC by 0.0015 for logistic regression but by 0.0084 for LightGBM, a 5.6-fold difference that reversed the leading rank. The XGBoost map assigns 1,038.7 km^2, or 17.40% of the province, to the high and very high classes, and the share of area actually inundated rises monotonically from 0.1% to 61.3% across the five classes.

Keywords: Flood susceptibility; spatial cross-validation; XGBoost; particle swarm optimisation; Ha Tinh.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngập lụt là thiên tai gây thiệt hại lớn nhất tại vùng Bắc Trung Bộ. Trận lũ tháng 10 năm 2020 làm ngập 118 trên 216 xã, phường của tỉnh Hà Tĩnh khi đó và gây thiệt hại vượt 5.300 tỷ đồng, còn trận lũ tháng 10/2010 đưa mực nước tại trạm Chu Lễ lên 16,56 m. Lập bản đồ phân vùng nguy cơ ngập cho toàn tỉnh vì vậy là yêu cầu cấp thiết đối với quy hoạch và phòng chống thiên tai.

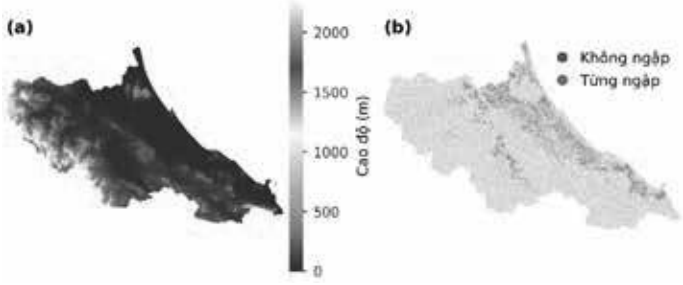
Hướng học máy thay việc mô phỏng quá trình vật lý bằng việc học quan hệ giữa vị trí đã từng ngập và tập biến địa hình, thuỷ văn, khí hậu, lớp phủ. Tehrany và cộng sự [1] kết hợp trọng số bằng chứng với máy véc-tơ tựa, Chen và cộng sự [2] so sánh các mô hình cây, Tien Bui và cộng sự [3] đề xuất mạng nơ-ron sâu cho nguy cơ lũ quét, trong khi Pham và cộng sự [4] kết luận ưu thế của học sâu không nhất quán và Grinsztajn và cộng sự [5] cho thấy trên dữ liệu dạng bảng, mô hình cây vẫn giữ ưu thế. Tại Việt Nam, Nguyen [6] đã mô hình hoá nguy cơ ngập cho chính tỉnh Hà Tĩnh bằng học máy kết hợp hệ thông tin địa lý.

Bốn hạn chế phương pháp luận chủ yếu vẫn tồn tại trong các nghiên cứu trước đây. Thứ nhất, phần lớn nghiên cứu chia mẫu ngẫu nhiên trong khi ô lưới lân cận có tự tương quan mạnh nên mô hình chỉ cần ghi nhớ vị trí là đạt chỉ số cao, như Roberts và cộng sự [7] cùng Ploton và cộng sự [8] đã chỉ ra. Thứ hai, các so sánh mô hình thực hiện trên tập mẫu và cách chia khác nhau nên khó kiểm chứng chéo. Thứ ba, hiệu của bước tối ưu siêu tham số hiếm khi được tách bạch. Thứ tư, chất lượng tập nhãn ít khi được kiểm chứng ngược với các trận lũ đã ghi nhận.

Nghiên cứu này tập trung khắc phục cả bốn hạn chế trên: bảy mô hình huấn luyện trên cùng tập mẫu và cùng bộ fold, đánh giá theo hai cách chia; một mạng nơ-ron cấu hình mặc định làm đối chứng cho mạng tối ưu bằng bầy đàn; tập nhãn lập từ ảnh Sentinel-1 và được đối chiếu với chín trận lũ có hồ sơ; và bản đồ của mô hình tốt nhất được đối chiếu với bản đồ của mạng nơ-ron.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Vùng nghiên cứu là toàn tỉnh Hà Tĩnh, 5.968,6 km^2, gồm 69 xã và phường theo địa giới hai cấp từ ngày 01/7/2025, với cao độ trung bình 171,4 m, 16,7% diện tích dưới cao trình 5 m và lượng mưa năm 1.992,6 mm, trong đó 63,0% rơi vào mùa mưa tháng VIII đến tháng XII. Đặc trưng địa hình và phân bố ô mẫu được trình bày ở Hình 1.



Hình 1. Vùng nghiên cứu: (a) cao độ, (b) phân bố ô mẫu

Tập nhãn được lập trong cùng đề tài bằng cách so sánh ảnh radar Sentinel-1 trước và sau đỉnh lũ giai đoạn 2015 - 2023 với ngưỡng tách nước −21 dB hiệu chuẩn theo diện tích mặt nước tham chiếu, xác định 564,7 km^2, tức 9,46% diện tích tỉnh, từng ngập ít nhất một lần. Đối chiếu với chín trận lũ có hồ sơ cho thấy bộ kiểm kê có độ chính xác cao nhưng chỉ phát hiện được hai trận, tức độ bao phủ thấp, nên nhãn âm có thể chứa ô thực tế từng ngập và mọi chỉ số trong bài đo mức khớp với bộ kiểm kê, không phải với toàn bộ thực tế ngập lụt. Hai mươi mốt biến đầu vào (Bảng 1) được chuẩn bị trên lưới 30 m hệ EPSG:32648 với 6.631.675 ô hợp lệ.

Bảng 1. Biến đầu vào của mô hình

Nhóm	Biến	Nguồn
Địa hình	Cao độ, độ dốc, hướng dốc, độ cong mặt cắt	Copernicus DEM GLO-30 [9]
Thuỷ văn	TWI, SPI, khoảng cách tới sông, khoảng cách tới mặt nước	Dẫn xuất từ DEM, OSM, WorldCover [10]
Khí hậu	Lượng mưa năm, lượng mưa cực trị Rx5day	CHIRPS 1990-2020 [11]
Lớp phủ	Chỉ thị đô thị, chỉ thị thực vật, chín lớp phủ mã hoá một-nóng	ESA WorldCover [10]

Tập mẫu gồm 40.000 ô đã từng ngập và 40.000 ô chưa ghi nhận ngập, rút với hạt giống cố định bằng 42. Bảy mô hình thuộc bốn họ được so sánh: hồi quy logistic; máy véc-tơ tựa hạt nhân xuyên tâm; rừng ngẫu nhiên 400 cây [12], XGBoost [13] và LightGBM với 500 cây; cùng hai mạng nơ-ron huấn luyện 150 vòng, một dùng cấu hình mặc định 64 nơ-ron, một do thuật toán bầy đàn [14] chọn qua tám hạt và tám vòng lặp, cho 142 nơ-ron mỗi lớp, hai lớp ẩn và bỏ bớt 0,0757.

Việc đánh giá thực hiện theo hai cách chia: cách thứ nhất phủ vùng nghiên cứu bằng ô vuông cạnh 5 km rồi gán ngẫu nhiên các ô vuông vào năm nhóm, nên mọi ô lưới trong cùng một ô vuông thuộc cùng một fold; cách thứ hai chia ngẫu nhiên từng ô lưới như thông lệ phổ biến. Cả hai dùng năm fold và cùng hạt giống nên chênh lệch chỉ phản ánh cách phân bổ không gian của tập kiểm tra. Các chỉ số tính theo phương trình (1), trong đó TP, TN, FP, FN là số ô dương thật, âm thật, dương giả, âm giả và p_e là xác suất đồng thuận ngẫu nhiên.

$$\mathrm{ACC} = \frac{\mathrm{TP}+\mathrm{TN}}{N}, \quad \kappa = \frac{\mathrm{ACC}-p_e}{1-p_e}, \quad \mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i - y_i)^2} \quad (1)$$

Độ quan trọng của biến được đo bằng hoán vị biến năm lần trên tập kiểm tra và bằng giá trị SHAP [15]. Mô hình tốt nhất được huấn luyện lại trên toàn bộ mẫu rồi áp lên 6.631.675 ô lưới và phân năm mức theo ngưỡng xác suất cố định 0,2, 0,4, 0,6 và 0,8.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Bảng 2. Kết quả theo cách chia không gian

Mô hình	AUC	ACC	Kappa	RMSE	Độ nhạy	Độ đặc hiệu
XGBoost	0,9660	0,9171	0,8343	0,2502	0,9402	0,8941
Rừng ngẫu nhiên	0,9659	0,9181	0,8363	0,2497	0,9466	0,8897
LightGBM	0,9654	0,9164	0,8328	0,2526	0,9373	0,8955
DNN-PSO	0,9610	0,9138	0,8276	0,2560	0,9476	0,8800
Hồi quy logistic	0,9562	0,9094	0,8187	0,2633	0,9540	0,8647
DNN mặc định	0,9546	0,9106	0,8213	0,2608	0,9564	0,8649
SVM-RBF	0,9437	0,9077	0,8155	0,2747	0,9546	0,8608

Kết quả bảy mô hình dưới kiểm định chéo theo ô không gian 5 km được trình bày ở Bảng 2. XGBoost dẫn đầu với AUC 0,9660, sát ngay sau là rừng ngẫu nhiên 0,9659 và LightGBM 0,9654, ba mô hình chênh nhau chưa tới 0,0006 nên khác biệt không có ý nghĩa thực tiễn. Mạng nơ-ron tối ưu bằng bầy đàn xếp thứ tư với 0,9610, song vượt mạng cấu hình mặc định ở cả năm fold với mức tăng trung bình 0,0064. Hồi quy logistic đạt 0,9562, cao hơn cả mạng nơ-ron mặc định là 0,9546, cho thấy một mạng sâu chưa tinh chỉnh không bảo đảm ưu thế so với mô hình tuyến tính. XGBoost phân loại đúng

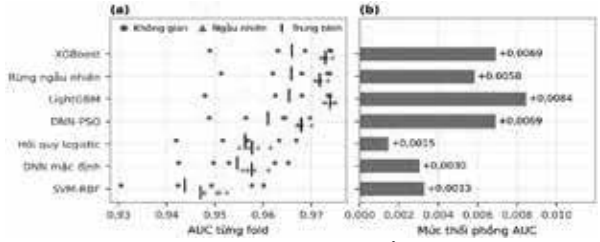
35.763 trên 40.000 ô không ngập và 37.608 trên 40.000 ô từng ngập, còn mạng nơ-ron gán nhãn nguy cơ rộng rãi hơn.

Khi chuyển sang cách chia ngẫu nhiên, mọi mô hình đều cải thiện nhưng mức cải thiện rất khác nhau (Bảng 3): hồi quy logistic chỉ tăng 0,0015 AUC trong khi LightGBM tăng 0,0084, chênh 5,6 lần, đủ để LightGBM vươn lên dẫn đầu với 0,9738 dù dưới chia không gian chỉ xếp thứ ba.

Bảng 3. Kết quả theo cách chia ngẫu nhiên

Mô hình	AUC	Kappa	ΔAUC so với chia không gian	Độ lệch chuẩn AUC giữa các fold
LightGBM	0,9738	0,8597	+0,0084	0,0009
XGBoost	0,9729	0,8569	+0,0069	0,0008
Rừng ngẫu nhiên	0,9717	0,8523	+0,0058	0,0010
DNN-PSO	0,9679	0,8453	+0,0069	0,0011
Hồi quy logistic	0,9577	0,8199	+0,0015	0,0023
DNN mặc định	0,9576	0,8270	+0,0030	0,0019
SVM-RBF	0,9470	0,8203	+0,0033	0,0018

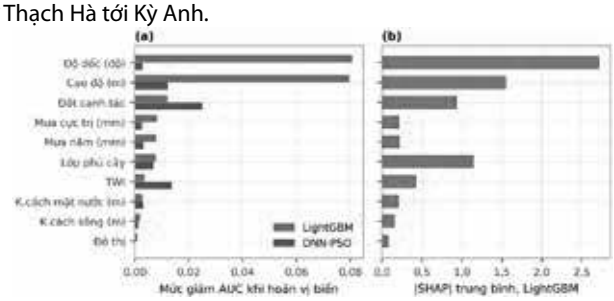
Cách chia ngẫu nhiên còn làm biến mất sự biến thiên giữa các fold (Hình 2) với XGBoost, độ lệch chuẩn AUC giữa năm fold giảm từ 0,0093 xuống 0,0008, nhỏ hơn khoảng mười một lần, và hiện tượng tương tự xuất hiện ở cả bảy mô hình. Khi chia ngẫu nhiên, mọi fold đều chứa mẫu trải khắp tỉnh nên không fold nào thực sự kiểm tra khả năng ngoại suy, còn dưới chia không gian dải AUC từng fold của XGBoost trải từ 0,9489 tới 0,9740.



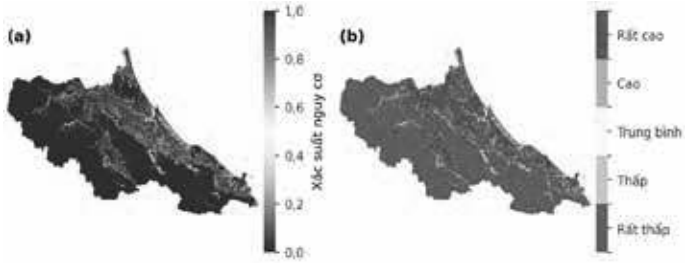
Hình 2. Cách chia mẫu: (a) AUC từng fold, (b) mức thổi phồng AUC

Độ quan trọng của biến ở Hình 3 cho thấy hai họ mô hình khai thác thông tin khác hẳn nhau dù đạt AUC gần bằng nhau. Hoán vị độ dốc làm LightGBM giảm 0,0807 AUC và hoán vị cao độ giảm 0,0796, trong khi ở mạng nơ-ron lớp phủ đất canh tác dẫn đầu với 0,0250 rồi tới chỉ số ẩm ướt địa hình 0,0137. Giá trị SHAP xác nhận điều này, với độ dốc 2,72 và cao độ 1,55 vượt xa lớp phủ đất canh tác 0,94. Như vậy mô hình cây dựa vào hai biến địa hình có ý nghĩa thuỷ văn trực tiếp còn mạng nơ-ron dựa vào lớp phủ, một biến chỉ thị gián tiếp.

Trên cơ sở đó, XGBoost được chọn để sinh bản đồ nguy cơ toàn tỉnh (Hình 4, Bảng 4). Mức cao và rất cao chiếm 1.038,7 km², bằng 17,40% diện tích tỉnh, tập trung dọc hạ lưu sông La và sông Nghèn, quanh vùng trũng Đức Thọ và Can Lộc, và dọc đồng bằng ven biển từ Thạch Hà tới Kỳ Anh.



Hình 3. Độ quan trọng biến: (a) hoán vị ở hai mô hình, (b) SHAP LightGBM



Hình 4. Bản đồ XGBoost: (a) xác suất nguy cơ, (b) phân vùng năm mức

Cột cuối của Bảng 4 là phép kiểm chứng độc lập với mọi chỉ số phân loại: tỷ lệ diện tích thực sự từng ngập tăng đơn điệu qua năm mức, từ 0,1% lên 4,0%, 9,7%, 21,3% và 61,3%. Xét theo đơn vị hành chính, xã Đông Kinh dẫn đầu với 81,9%, tiếp theo là Đức Quang 68,9% và Mai Phụ 68,3%, chín trong mười đơn vị đứng đầu nằm ở dải đồng bằng phía đông.

Bảng 4. Diện tích theo năm mức nguy cơ

Mức nguy cơ	XGBoost (km²)	XGBoost (%)	DNN-PSO (km²)	Tỷ lệ từng ngập (%)
Rất thấp	4.541,7	76,09	4.536,2	0,1
Thấp	209,2	3,51	178,7	4,0
Trung bình	178,9	3,00	182,7	9,7
Cao	231,7	3,88	227,3	21,3
Rất cao	807,0	13,52	843,7	61,3

So với bản đồ của mạng nơ-ron, hệ số tương quan Pearson giữa hai lớp xác suất đạt 0,9756, hệ số Kappa giữa hai bản đồ phân vùng đạt 0,7762 và chỉ 8,93% diện tích tỉnh đổi mức khi chuyển mô hình, phần lớn là giữa các mức liền kề ở vùng chuyển tiếp giữa đồng bằng và đồi thấp.

4. THẢO LUẬN

Mô hình cây tăng cường vượt mạng nơ-ron sâu trên bài toán này, phù hợp với Pham và cộng sự [4] rằng ưu thế của học sâu không nhất quán và với Grinsztajn và cộng sự [5] rằng mô hình cây khai thác hiệu quả hơn các biến không đồng nhất về thang đo. Mức tăng 0,0064 AUC mà bầy đàn mang lại là đáng kể so với 0,0006 chênh lệch giữa các mô hình cây, song mạng chưa tinh chỉnh chỉ đạt 0,9546, thấp hơn hồi quy logistic, nên phần lớn khoảng cách giữa mạng sâu và mô hình tuyến tính trong các nghiên cứu trước như của Tien Bui và cộng sự [3] có thể đến từ công sức tinh chỉnh hơn là từ độ sâu kiến trúc.

Phát hiện có ý nghĩa phương pháp luận lớn nhất là mức thổi phồng phụ thuộc họ mô hình, chênh 5,6 lần. Roberts và cộng sự [7] cùng Ploton và cộng sự [8] đã cảnh báo kiểm định không gian làm giảm chỉ số nhưng chỉ xét từng mô hình riêng lẻ; kết quả ở đây cho thấy mọi so sánh dưới cách chia ngẫu nhiên đều thiên lệch có hệ thống, thiên vị đúng những mô hình linh hoạt nhất. Khi hai mô hình đạt chỉ số gần nhau thì cơ chế học được nên là tiêu chí phân định, đúng như Chen và cộng sự [2] nhấn mạnh về vai trò chọn biến, và mô hình phụ thuộc nặng vào lớp phủ sẽ kém bền vững hơn mô hình dựa vào địa hình.

Giới hạn quan trọng nhất nằm ở tập nhãn: bộ kiểm kê Sentinel-1 chỉ phát hiện hai trong chín trận lũ có hồ sơ, nên nhãn âm chắc chắn chứa ô thực tế từng ngập và bản đồ nhiều khả năng thiên về vùng trũng thoát nước chậm hơn là vùng ngập nhanh rồi rút nhanh. Phép kiểm chứng đơn điệu ở Bảng 4 không loại bỏ được hạn chế này vì vẫn dùng chính bộ kiểm kê làm chuẩn. Nguyen [6] cũng lập bản đồ nguy cơ cho chính tỉnh Hà

Tĩnh nhưng từ một tập điểm ngập thu thập theo cách khác, nên hai kết quả không so sánh trực tiếp được về chỉ số; điều đó càng cho thấy tập nhãn cần được mô tả và kiểm chứng công khai kèm theo mô hình. Hướng khắc phục là bổ sung vết lũ thực đo từ hồ sơ phòng chống thiên tai.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã so sánh bảy mô hình học máy trên cùng tập mẫu 80.000 ô lưới và cùng bộ fold cho bài toán lập bản đồ nguy cơ ngập lụt tỉnh Hà Tĩnh. Dưới kiểm định chéo theo ô vuông 5 km, XGBoost dẫn đầu với AUC 0,9660 và Kappa 0,8343, trong khi mạng nơ-ron tối ưu bằng bầy đàn đạt 0,9610, tức mức tăng 0,0064 so với cấu hình mặc định là thực chất nhưng không đủ để vượt nhóm mô hình cây.

Mức thổi phồng do chia mẫu ngẫu nhiên không đồng đều giữa các mô hình, từ 0,0015 ở hồi quy logistic tới 0,0084 ở LightGBM, nên kiểm định chéo theo khối không gian cần được coi là yêu cầu bắt buộc khi công bố mô hình nguy cơ ngập lụt. Bản đồ do XGBoost sinh ra xác định 1.038,7 km², bằng 17,40% diện tích tỉnh, ở mức nguy cơ cao và rất cao, với tỷ lệ diện tích từng ngập tăng đơn điệu từ 0,1% lên 61,3% qua năm mức, và chỉ 8,93% diện tích đổi mức khi thay mạng nơ-ron bằng XGBoost nên sản phẩm ổn định trước lựa chọn mô hình. Hướng tiếp theo là bổ sung vết lũ thực đo và mở rộng sang các kịch bản mưa cực trị.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được thực hiện trong khuôn khổ đề tài khoa học và công nghệ cấp tỉnh theo Quyết định số 529/QĐ-SKHCN ngày 06/11/2024 của Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Hà Tĩnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. S. Tehrany, B. Pradhan and M. N. Jebur. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology, vol. 512, pp. 332-343, 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008.

[2] W. Chen, Y. Li, W. Xue, H. Shahabi, S. Li, H. Hong, X. Wang, H. Bian, S. Zhang, B. Pradhan and B. B. Ahmad. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. Science of the Total Environment, vol. 701, Art. no. 134979, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134979.

[3] D. Tien Bui, N.-D. Hoang, F. Martínez-Álvarez, P.-T. T. Ngo, P. V. Hoa, T. D. Pham, P. Samui and R. Costache. A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood susceptibility: A case study at a high frequency tropical storm area. Science of the Total Environment, vol. 701, Art. no. 134413, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134413.

[4] B. T. Pham, C. Luu, T. V. Phong, P. T. Trinh, A. Shirzadi, S. Renoud, S. Asadi, H. V. Le, J. von Meding and J. J. Clague. Can deep learning algorithms outperform benchmark machine learning algorithms in flood susceptibility modeling? Journal of Hydrology, vol. 592, Art. no. 125615, 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125615.

[5] L. Grinsztajn, E. Oyallon and G. Varoquaux. Why do tree-based models still outperform deep learning on typical tabular data? Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 35, pp. 507-520, 2022.

[6] H. D. Nguyen. Spatial modeling of flood hazard using machine learning and GIS in Ha Tinh province, Vietnam. Journal of Water and Climate Change, vol. 14, no. 1, pp. 200-222, 2023, doi: 10.2166/wcc.2022.257.

[7] D. R. Roberts, V. Bahn, S. Ciuti, M. S. Boyce, J. Elith, G. Guillera-Arroita, S. Hauenstein, J. J. Lahoz-Monfort, B. Schröder, W. Thuiller, D. I. Warton, B. A. Wintle, F. Hartig and C. F. Dormann. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. Ecography, vol. 40, no. 8, pp. 913-929, 2017, doi: 10.1111/ecog.02881.

[8] P. Ploton, F. Mortier, M. Réjou-Méchain, N. Barbier, N. Picard, V. Rossi, C. Dormann, G. Cornu, G. Viennois, N. Bayol, A. Lyapustin, S. Gourlet-Fleury and R. Pélissier. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. Nature Communications, vol. 11, no. 1, Art. no. 4540, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-18321-y.

[9] European Space Agency and Sinergise. Copernicus Global Digital Elevation Model GLO-30. European Space Agency, 2021, doi: 10.5270/ESA-c5d3d65.

[10] D. Zanaga, R. Van De Kerchove, W. De Keersmaecker, N. Souverijns, C. Brockmann, R. Quast, J. Wevers, A. Grosu, A. Paccini, S. Vergnaud, O. Cartus, M. Santoro, S. Fritz, I. Georgieva, M. Lesiv, S. Carter, M. Herold, L. Li, N.-E. Tsendbazar, F. Ramoino and O. Arino. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. Zenodo, 2021, doi: 10.5281/zenodo.5571936.

[11] C. Funk, P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell and J. Michaelsen. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, vol. 2, no. 1, Art. no. 150066, 2015, doi: 10.1038/sdata.2015.66.

[12] L. Breiman. Random forests. Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.

[13] T. Chen and C. Guestrin. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 785-794, 2016, doi: 10.1145/2939672.2939785.

[14] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

[15] S. M. Lundberg and S.-I. Lee. A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 30, pp. 4765-4774, 2017.

■ Ngày nộp bài: 03/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 09/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 28/10/2026

Ảnh hưởng của tiết diện trống trong giai đoạn khai thác đến tỷ lệ chắn trong thiết kế mặt cắt hầm TBM đường sắt tốc độ cao

Effect of operational free cross-sectional area on blockage ratio in cross-section design of high-speed rail TBM tunnels

> THS.NCS NGUYỄN THÁI KHANH, TS NGUYỄN HUY NGHĨA, GS.TS TRẦN THẾ TRUYỀN*, TS PHẠM VĂN HÙNG
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: tranthetruyen@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất trình tự đánh giá sơ bộ mặt cắt hầm TBM đường sắt tốc độ cao trên cơ sở tiết diện trống trong giai đoạn khai thác. Mô hình hình học xét phần đáy quy đổi và các cấu kiện chiếm chỗ liên tục, kết hợp tính tỷ lệ chắn, phân tích độ nhạy, xác định cận theo khoảng đầu vào và tính ngược đường kính hầm. Với tiết diện tàu 12 m^2, chiều cao phần đáy 1,5 m và diện tích cấu kiện 1 m^2, tỷ lệ chắn ứng với đường kính trong 8,5; 9,0; 9,5 m lần lượt là 0,2449; 0,2156; 0,1914. Nếu bỏ qua diện tích chiếm chỗ, tỷ lệ chắn bị đánh giá thấp 11,54 - 13,66%. Với tỷ lệ chắn mục tiêu giả định 0,20, đường kính tính theo tiết diện trống là 9,312 m, lớn hơn 0,571 m so với cách tính theo toàn bộ diện tích hình tròn. Các kết quả được kiểm tra bằng tích phân số, sai phân trung tâm và thay nghiệm. Vì vậy, phương pháp chỉ phục vụ lựa chọn sơ bộ, không thay thế đánh giá và kiểm chứng khí động.

Từ khóa: Hầm TBM; đường sắt tốc độ cao; tiết diện trống; tỷ lệ chắn; độ nhạy hình học; thiết kế mặt cắt hầm.

ABSTRACT

A preliminary cross-section screening procedure is presented for high-speed railway TBM tunnels using the operational free cross-sectional area. The geometric model accounts for the equivalent occupied bottom segment and continuously distributed obstructions, combining blockage-ratio calculation, sensitivity analysis, bounds over input ranges and inverse tunnel-diameter calculation. For a train cross-sectional area of 12 m^2, a bottom segment height of 1.5 m and an additional obstruction area of 1 m^2, internal tunnel diameters of 8.5, 9.0 and 9.5 m yield blockage ratios of 0.2449, 0.2156 and 0.1914. Neglecting obstructions underestimates the ratio by 11.54 - 13.66%. At an illustrative target ratio of 0.20, the calculated diameter is 9.312 m, or 0.571 m greater than that obtained using the full circular area. Numerical quadrature, central differences, and solution substitution check the calculations. The procedure supports preliminary geometric screening, not aerodynamic validation or final tunnel sizing.

Keywords: TBM tunnel; high-speed railway; free cross-sectional area; blockage ratio; geometric sensitivity; tunnel cross-section design.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thiết kế hầm đường sắt tốc độ cao, tỷ lệ chắn phải được tính theo diện tích dành cho không khí khi chưa có tàu, sau khi loại trừ các cấu kiện chiếm chỗ liên tục [1]. EN 14067-5 [2] gọi đây là tiết diện trống (free cross-sectional area). Vì vậy, cần phân biệt diện tích hình tròn theo đường kính trong với tiết diện trống thực tế của hầm sau hoàn thiện.

EN 14067-5 [2] quy định các yêu cầu đánh giá khí động trong hầm. Các nghiên cứu của Howe [3] và Wang cùng cộng sự [4] cho thấy hình học cửa hầm, mặt cắt ảnh hưởng đến sóng áp suất. Tuy nhiên, thay đổi tỷ lệ chắn không thể được đồng nhất với mức thay đổi áp suất.

Bài báo xác định sai lệch tỷ lệ chắn khi bỏ qua diện tích chiếm chỗ, phân tích độ nhạy và tính ngược đường kính theo mục tiêu giả định. Đóng góp của nghiên cứu là kết hợp các quan hệ hình học đã biết thành trình tự tính thuận, xác định cận theo khoảng đầu vào và giải bài toán ngược có thể tái lập, không phải đề xuất công thức hình học mới. Do đó, kết quả chỉ phục vụ lựa chọn sơ bộ, việc đánh giá áp suất và kết cấu cần được thực hiện ở bước tiếp theo.

2. MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Các thông số cơ bản

Mô hình xét một ống hầm tròn có một đường tàu, không trao đổi khí với ống bên cạnh. Phần đáy quy đổi được giả thiết kín; cấu kiện liên tục được quy đổi theo diện tích chiếm chỗ. Cách quy đổi này phục vụ tính toán sơ bộ, không mô tả đầy đủ mặt cắt sau hoàn thiện.

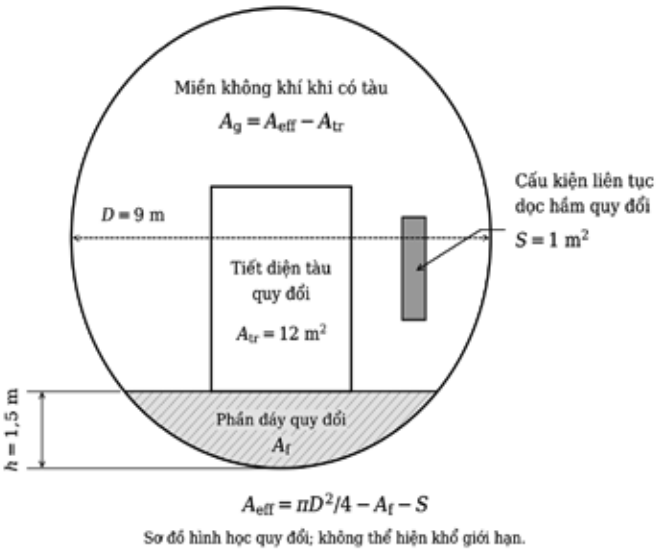
Diện tích tàu A_{tr} = 12 m² được chọn theo FRA [1] và EN 14067-5 [2]. Bảng 1 tổng hợp các đầu vào. D là đường kính trong của vỏ hầm; h đo từ điểm thấp nhất của đường tròn đến mặt trên phần đáy quy đổi. Khoang thông khí dưới sàn, nếu có, cần mô hình hóa riêng.

Bảng 1. Thông số cơ sở và phạm vi khảo sát

Thông số	Giá trị	Cơ sở sử dụng
D	8,5; 9,0; 9,5 m	Biến khảo sát giả định
A_{tr}	12 m²	Giá trị tham chiếu [1, 2]
h; S	1,5 m; 1 m²	Giả thiết quy đổi phần chiếm chỗ
h khảo sát riêng	1,2–1,8 m	Giữ A_{tr} = 12 m² và S = 1 m²

S chỉ tính diện tích cấu kiện liên tục nằm ngoài phần đáy đã trừ; phải loại phần chồng lắp giữa các cấu kiện để tránh tính trùng. Thiết bị cục bộ được đánh giá riêng [1]. Khi áp dụng thực tế, A_{eff} phải được đo bóc từ đường bao mặt cắt sau hoàn thiện trên bản vẽ CAD, có xét điều kiện thông khí dưới sàn nếu tồn tại.

2.2. Tiết diện trống và sai lệch tỷ lệ chắn



Hình 1. Mô hình mặt cắt quy đổi tại D = 9 m

Hình minh họa diện tích quy đổi, không thể hiện khổ giới hạn và vị trí lắp đặt thực tế. Nguồn: Nhóm tác giả.

Đặt R = D/2, $A_0 = \pi R^2$. Với $0 \le h \le D$, diện tích viên phân A_f, tiết diện trống A_{eff} và diện tích không khí còn lại khi có tàu Ag được tính theo:

$$A_f = R^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh - h^2} \quad (1)$$

$$A_{eff} = A_0 - A_f - S; \quad A_g = A_{eff} - A_{tr}; \quad \beta = \frac{A_{tr}}{A_{eff}} \quad (2)$$

Các công thức áp dụng khi $A_{eff} > A_{tr} > 0$. Mẫu số của tỷ lệ chắn β là A_{eff}, không phải A_g. Điều kiện về diện tích không thay thế yêu cầu kiểm tra khổ giới hạn, khe hở và thoát hiểm.

Gọi λ là tỷ phần diện tích chiếm chỗ so với A_0; β_0 là tỷ lệ chắn tính theo toàn bộ A_0. Khi đó:

$$\lambda = \frac{A_f + S}{A_0}; \quad \beta_0 = \frac{A_{tr}}{A_0}; \quad \beta = \frac{\beta_0}{1-\lambda} \quad (3)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{\beta - \beta_0}{\beta} = \lambda \quad (4)$$

Theo (3)-(4), mức đánh giá thấp tương đối so với β bằng 100λ%; nếu lấy β_0 làm mốc, chênh lệch là 100λ/(1 − λ)%. Vì vậy, mức sai lệch có thể tính trực tiếp từ hình học mặt cắt mà không cần sử dụng quan hệ thực nghiệm.

Đặt η = h/R để biểu diễn λ dưới dạng không thứ nguyên:

$$\lambda = \frac{\arccos(1-\eta) - (1-\eta)\sqrt{2\eta - \eta^2}}{\pi} + \frac{S}{\pi R^2} \quad (5)$$

β không đổi nếu đồng thời giữ nguyên η, S/R^2 và A_{tr}/R^2. Trong khảo sát dưới đây, h, S và A_{tr} được giữ theo giá trị tuyệt đối khi thay đổi D.

2.3. Độ nhạy và bài toán ngược

Đặt $b = \sqrt{2Rh - h^2}$ và $\theta = \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)$. Khi giữ h và S không đổi, phép tính vi phân cho kết quả:

$$K = \frac{\partial A_{eff}}{\partial D} = R(\pi - \theta) + b > 0 \quad (6)$$

Với 0 < h < D và $A_{eff} > A_{tr}$, các đạo hàm riêng của tỷ lệ chắn là:

$$\frac{\partial \beta}{\partial D} = -\frac{A_{tr} K}{A_{eff}^2}; \quad \frac{\partial \beta}{\partial h} = \frac{2A_{tr} b}{A_{eff}^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial S} = \frac{A_{tr}}{A_{eff}^2}; \quad \frac{\partial \beta}{\partial A_{tr}} = \frac{1}{A_{eff}} \quad (8)$$

Hệ số độ nhạy tương đối $C_x = (x/\beta)(\partial\beta/\partial x)$, với $x \in \{D, h, S, A_{tr}\}$, biểu thị mức thay đổi tương đối của β khi một đầu vào biến thiên nhỏ, các biến còn lại cố định. Nếu S = 0, dùng đạo hàm theo S thay cho độ nhạy tương đối.

Đường kính theo tỷ lệ chắn mục tiêu giả định β* được tìm từ:

$$F(D) = A_{eff}(D, h, S) - \frac{A_{tr}}{\beta^*} = 0 \quad (9)$$

Vì K > 0, F(D) tăng nghiêm ngặt trong miền hình học hợp lệ; nếu có nghiệm thì nghiệm là duy nhất. D được giải bằng chia đôi trên [6; 12] m khi giá trị F đổi dấu, dừng với độ rộng khoảng dưới 10^{-10} m và kiểm tra bằng thay nghiệm vào (9). Ngưỡng dừng này chỉ dùng để kiểm tra thuật toán.

Các giá trị β* = 0,20; 0,22; 0,24 chỉ dùng minh họa, không phải giới hạn áp suất theo tiêu chuẩn hay căn cứ quyết định đường kính thiết kế.

2.4. Giới hạn biến thiên theo khoảng giá trị đầu vào và kiểm tra tính toán

Từ tính đơn điệu của (7)-(8), có thể xác định cận dưới và trên của β cho các khoảng đầu vào:

$$\beta_{min} = \frac{A_{tr,min}}{A_{eff}(D_{max}, h_{min}, S_{min})} \quad (10a)$$

$$\beta_{max} = \frac{A_{tr,max}}{A_{eff}(D_{min}, h_{max}, S_{max})} \quad (10b)$$

Các cận (10) có hiệu lực khi mọi tổ hợp xét đều hợp lệ về hình học. Đây là giới hạn toán học theo miền đầu vào, không phải sai số

đo, khoảng tin cậy hay xác suất an toàn; nếu các đầu vào bị ràng buộc, phải thu hẹp miền xét.

Công thức (1) được đối chiếu bằng tích phân số ở chín tổ hợp D = {8,5; 9,0; 9,5} m và h = {1,2; 1,5; 1,8} m, cho sai khác diện tích dưới 10^{-10} m². Đạo hàm (7)-(8) được kiểm tra bằng sai phân trung tâm với gia số 10^{-5}, cho sai khác tương đối lớn nhất dưới 10^{-7}. Sai số diện tích khi thay nghiệm vào (9) dưới 10^{-8} m²; cận (10) được kiểm tra với 16 tổ hợp biên. Các đối chiếu này chỉ kiểm tra phép tính hình học, chưa phải kiểm chứng khí động.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sai lệch khi sử dụng diện tích hình tròn

Bảng 2. Kết quả với A_{tr} = 12 m², h = 1,5 m và S = 1 m²

D (m)	A_0 (m²)	A_f (m²)	A_{eff} (m²)	β	ε_β (%)
8,5	56,745	6,751	48,994	0,2449	13,66
9,0	63,617	6,969	55,648	0,2156	12,53
9,5	70,882	7,181	62,701	0,1914	11,54

Bảng 2 cho thấy khi D tăng từ 8,5 lên 9,5 m, A_{eff} tăng 27,98% và β giảm 21,86%. Nếu bỏ qua diện tích chiếm chỗ, β bị đánh giá thấp 11,54 - 13,66%; riêng D = 9 m, β0 = 0,1886 so với β = 0,2156. Chênh lệch trên bắt nguồn từ cách xác định diện tích hầm, trước cả bước phân tích khí động.

Mức giảm β không đồng nghĩa với mức giảm áp suất tương ứng. Ngay cả khi có cùng A_{eff}, các mặt cắt khác nhau về khe hở, chu vi ướt và bố trí thiết bị vẫn có thể cho diễn biến dòng khí khác nhau.

3.2. Độ nhạy và khoảng biến thiên đầu vào

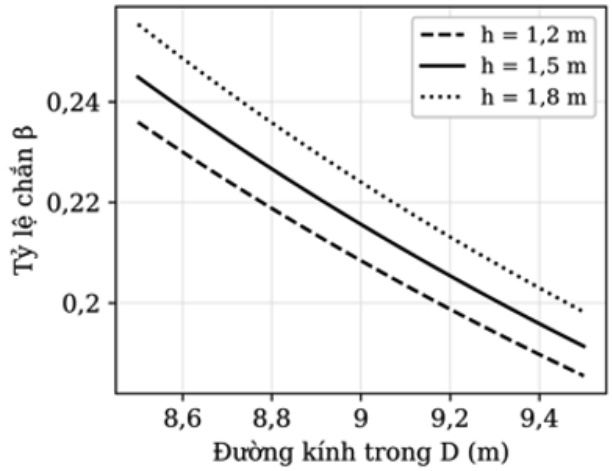
Ở cấu hình cơ sở D = 9 m, h = 1,5 m, S = 1 m², K = 13,7065 m. Bảng 3 trình bày hệ số độ nhạy C_x và ảnh hưởng tuyến tính theo khoảng giả định. D có $|C_x|$ lớn nhất, nhưng A_{tr} gây biến thiên lớn nhất trong các khoảng khảo sát. Vì vậy, ưu tiên kiểm soát đầu vào cần xét đồng thời hệ số độ nhạy và độ rộng khoảng biến thiên.

Bảng 3. Độ nhạy tại điểm cơ sở và khoảng khảo sát minh họa

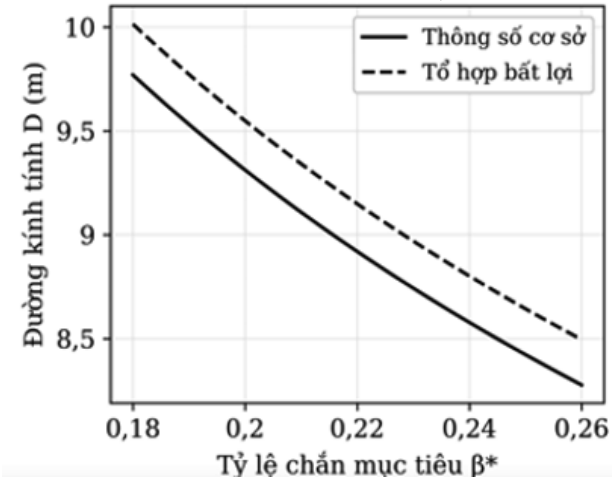
Biến x	C_x	Khoảng biến thiên quanh giá trị cơ sở	$\lvert C_x\rvert \Delta x/x$ (%)
D	-2,2168	±0,05 m	1,23
h	0,1808	±0,10 m	1,21
S	0,0180	±0,20 m²	0,36
A_{tr}	1,0000	±0,50 m²	4,17

Với D ∈ [8,95; 9,05] m, h ∈ [1,4; 1,6] m, S ∈ [0,8; 1,2] m² và A_{tr} ∈ [11,5; 12,5] m², thu được β ∈ [0,2011; 0,2311]. Cận dưới giảm 6,77%, cận trên tăng 7,17% so với cấu hình cơ sở; xấp xỉ tuyến tính cho tổng mức ảnh hưởng khoảng 6,96%. Các khoảng này chỉ dùng khảo sát, không phải dung sai thi công hay phân bố xác suất.

Trong các khoảng xét, ảnh hưởng tuyến tính của A_{tr} là 4,17% (Bảng 3). Hình 2a cho thấy riêng ảnh hưởng của h khi S và A_{tr} cố định.



a) - Ảnh hưởng của phân đáy



b) - Bài toán ngược có điều kiện

Hình 2. a) - Ảnh hưởng của D, h đến β khi S = 1 m², A_{tr} = 12 m²; b) - Quan hệ giữa D và β*. Tổ hợp bất lợi: h = 1,6 m, S = 1,2 m², A_{tr} = 12,5 m². Đường cong tính theo (1)-(9).

3.3. Tính ngược đường kính và mức điều chỉnh theo thay đổi hình học

Bảng 4 đối chiếu đường kính theo (9) và D_0, đường kính tính theo toàn bộ diện tích hình tròn. Ở ba mức β* minh họa, phần diện tích chiếm chỗ làm đường kính tính toán tăng 0,57 - 0,60 m. Mức tăng này chỉ phản ánh bộ thông số đã xét, không phải kiến nghị kích thước cho dự án cụ thể.

Bảng 4. Đường kính theo tỷ lệ chắn mục tiêu giả định

β*	D_0 (m)	D cơ sở (m)	D - D_0 (m)	D bất lợi (m)
0,20	8,740	9,312	0,571	9,548
0,22	8,334	8,919	0,586	9,149
0,24	7,979	8,578	0,599	8,801

Với β* = 0,20, D cơ sở = 9,312 m; tổ hợp bất lợi h = 1,6 m, S = 1,2 m², A_{tr} = 12,5 m² cho D = 9,548 m, tăng 0,237 m. Với β* = 0,22, D = 9 m đạt mục tiêu ở bộ thông số cơ sở nhưng không đạt tại cận trên β = 0,2311. Sự khác biệt này cho thấy lựa chọn sơ bộ phụ thuộc khoảng biến thiên của các thông số đầu vào.

Với biến thiên nhỏ và yêu cầu giữ β không đổi, có thể ước tính mức điều chỉnh D bằng quan hệ vi phân:

$$dD = \frac{2b\,dh + dS + (1/\beta)dA_{tr}}{K} \quad (11)$$

Tại điểm cơ sở, nếu h tăng 0,10 m thì cần tăng D xấp xỉ 0,049 m; nếu S tăng 1 m^2 thì tăng D khoảng 0,073 m (các biến khác cố định). Vì (11) chỉ là xấp xỉ bậc nhất, khi thông số thay đổi lớn cần giải lại (9) và kiểm tra các điều kiện về hình học và kết cấu.

4. LIÊN HỆ VỚI ĐÁNH GIÁ KHÍ ĐỘNG VÀ THIẾT KẾ

4.1. Ý nghĩa của kết quả hình học đối với phân tích khí động

Kết quả tại Mục 3 cho thấy việc loại trừ phần đáy và các cấu kiện chiếm chỗ có thể làm thay đổi đáng kể tỷ lệ chắn, ngay cả khi đường kính trong của vỏ hầm không đổi. Chẳng hạn, với D = 9 m, tỷ lệ chắn tính theo tiết diện trống là 0,2156, so với 0,1886 khi dùng toàn bộ diện tích hình tròn (Bảng 2). Sự khác biệt này cần được phản ánh nhất quán khi xây dựng dữ liệu hình học đầu vào cho các phân tích khí động.

Phân tích độ nhạy (Bảng 3) và kết quả tính ngược (Bảng 4) giúp nhận biết các thông số ảnh hưởng lớn, từ đó lựa chọn cấu hình cần khảo sát sâu hơn. Tuy vậy, tỷ lệ chắn chỉ là một trong các yếu tố chi phối diễn biến áp suất; kết quả còn phụ thuộc vận tốc và hình dạng tàu, chiều dài hầm, hình học cửa hầm và điều kiện thông khí [1-4]. Vì vậy, các tỷ lệ chắn mục tiêu giả định trong bài không thể dùng trực tiếp để kết luận về áp suất hoặc đường kính thiết kế.

4.2. Giới hạn áp dụng và yêu cầu kiểm chứng

Trong thiết kế thực tế, tiết diện trống phải được xác định từ mặt cắt sau hoàn thiện, có xét các cấu kiện bố trí liên tục dọc hầm và tránh tính trùng diện tích chiếm chỗ. Đồng thời, cần kiểm tra khổ giới hạn, thoát hiểm, kết cấu vỏ hầm và yêu cầu lắp đặt thiết bị; với hầm có khoang thông khí dưới sàn, hốc cục bộ hoặc liên thông giữa các ống hầm, mô hình hình học cần được điều chỉnh phù hợp.

Đối với các phương án được lựa chọn qua bước đánh giá sơ bộ, phân tích khí động chi tiết cần xét dòng khí không ổn định, có tính nén được, chuyển động tàu và điều kiện biên phù hợp. Kết quả mô phỏng phải được kiểm tra hội tụ lưới, bước thời gian và đối chiếu với dữ liệu thí nghiệm hoặc hiện trường độc lập [5, 6]. Các phép kiểm tra tại Mục 2.4 chỉ xác nhận tính đúng đắn của tính toán hình học, chưa kiểm chứng khả năng dự báo áp suất, đây là giới hạn cần lưu ý khi sử dụng phương pháp để lựa chọn sơ bộ mặt cắt hầm.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu kết hợp xác định tiết diện trống, tính tỷ lệ chắn, phân tích độ nhạy, xác định cận theo khoảng đầu vào và giải bài toán ngược thành trình tự đánh giá sơ bộ có thể kiểm tra và tái lập. Điểm đóng góp chính là tính hệ thống và khả năng tái lập trên cơ sở các quan hệ hình học đã biết.

Trong ba cấu hình minh họa, dùng toàn bộ diện tích hình tròn làm β bị đánh giá thấp 11,54 - 13,66%. Với β* giả định 0,20, D cơ sở là 9,312 m so với 8,740 m khi bỏ qua phần chiếm chỗ; tổ hợp bất lợi cho D = 9,548 m. Do đó, các đường kính tính được chỉ có ý nghĩa với bộ thông số khảo sát, không phải khuyến nghị chung.

Các phép tích phân số, sai phân trung tâm và thay nghiệm chỉ kiểm tra tính toán hình học. Vì vậy, khi áp dụng cho dự án cần sử dụng mặt cắt hoàn thiện, kiểm tra các yêu cầu cấu tạo, kết cấu và đánh giá, kiểm chứng khí động bằng dữ liệu độc lập trước khi quyết định kích thước hầm.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo qua Đề tài mã số CTB2025-GHA-06.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. Sturt, P. Lynch, R. Burns, S. Clark, B. Horton, P. Derkowski, A. Keylin and N. Wilson. Aerodynamic Assessment and Mitigation - Design Considerations for High-Speed Rail. Federal Railroad Administration, Rep. DOT/FRA/ORD-22/28, Jul. 2022.

[2] CEN. Railway Applications - Aerodynamics - Part 5: Requirements and Assessment Procedures for Aerodynamics in Tunnels. EN 14067-5:2021, 2021, corrigendum AC:2023.

[3] M. S. Howe. On the compression wave generated when a high-speed train enters a tunnel with a flared portal. Journal of Fluids and Structures, vol. 13, no. 4, pp. 481-498, 1999, doi: 10.1006/jfls.1999.0217.

[4] T. Wang, F. Wu, M. Yang, P. Ji and B. Qian. Reduction of pressure transients of high-speed train passing through a tunnel by cross-section increase. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 183, pp. 235-242, 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.11.001.

[5] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman and P. E. Raad. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, vol. 130, no. 7, Art. no. 078001, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.

[6] NASA NPARC Alliance. Validation assessment. Tutorial on CFD Verification and Validation. Internet: https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/valassess.html (accessed: Oct. 7, 2026).

■ Ngày nộp bài: 05/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 03/11/2026

Nghiên cứu đánh giá khả năng chịu tải chất ô nhiễm của môi trường nước mặt tại sông Luộc đoạn qua tỉnh Hưng Yên phục vụ quản lý chất lượng tài nguyên nước

Research on assessing the assimilative capacity of surface water for pollutants in the Luoc river section flowing through Hung Yen province for water resource quality management

> THS NGUYỄN TUẤN KIỆT[1], TS NGÔ QUANG DỰ[2,*], TS VŨ VĂN KHOÁT[2]
[1]Công ty Cổ phần Phát triển chăn nuôi Hòa Phát
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: nqdu@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Sông Luộc là một trong những tuyến sông quan trọng thuộc hệ thống sông Hồng - Thái Bình, đóng vai trò quan trọng trong cấp nước sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp, công nghiệp và giao thông thủy cho tỉnh Hưng Yên và khu vực lân cận. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp đánh giá trực tiếp theo hướng dẫn tại Thông tư 95/2025/TT-BNNMT để đánh giá khả năng chịu tải chất ô nhiễm của môi trường nước mặt tại đoạn sông Luộc dài 52 km chảy qua tỉnh Hưng Yên, làm cơ sở khoa học phục vụ quản lý chất lượng tài nguyên nước phục vụ phát triển bền vững. Trên cơ sở số liệu quan trắc chất lượng nước mặt sông trong năm 2025 với lưu lượng dòng chảy trung bình mùa cạn của sông (Q=100 m^3/s) đã tính toán khả năng chịu tải đối với 7 thông số đặc trưng (BOD_5, COD, TSS, NH_4^+, tổng Nitơ, tổng Photpho và tổng Coliform) cho thấy nguồn nước sông vẫn còn khả năng tiếp nhận thêm tải lượng đối với BOD_5 (14.688 kg/ngày), COD (28.512 kg/ngày), tổng Photpho (492 kg/ngày) và NH_4^+ (2.186 kg/ngày). Trong khi đó, TSS, tổng Nitơ và tổng Coliform của sông đã vượt khả năng chịu tải, với giá trị lần lượt là -103.680 kg/ngày, -13.824 kg/ngày và -23.906.880 kg/ngày.

Từ khóa: Sức chịu tải; môi trường nước mặt; quản lý chất lượng tài nguyên nước.

ABSTRACT

The Luoc River is one of the major rivers in the Hong River - Thai Binh River system. It plays an important role in supplying water for domestic use, agricultural and industrial production and waterway transport in Hung Yen Province and neighboring areas. This research applies the direct assessment method in accordance with Circular No. 95/2025/TT-BNNMT to evaluate the assimilative capacity of surface water in a 52 km section of the Luoc River flowing through Hung Yen Province. The findings provide a scientific basis for managing water quality and supporting the sustainable development of water resources. Based on surface water quality monitoring data collected in 2025 and considering the river's average dry-season flow rate (Q = 100 m^3/s), the study calculated the assimilative capacity for seven key water quality parameters: BOD_5, COD, TSS, NH_4^+, total nitrogen, total phosphorus and total coliforms. The results indicate that the river still has additional assimilative capacity for BOD_5 (14,688 kg/day), COD (28,512 kg/day), total phosphorus (492 kg/day) and NH_4^+ (2,186 kg/day). However, the assimilative capacity for TSS, total nitrogen and total coliforms has been exceeded, with values of -103,680 kg/day, -13,824 kg/day and -23,906,880 kg/day, respectively.

Keywords: Assimilative capacity; surface water environment; water resource quality management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tài nguyên nước mặt sông đóng vai trò đặc biệt quan trọng đối với phát triển kinh tế - xã hội, bảo đảm an ninh môi trường và duy trì cân bằng hệ sinh thái, là nguồn cung cấp nước chủ yếu phục vụ sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp, công nghiệp và các hoạt động kinh tế khác. Tuy nhiên, cùng với quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa

và gia tăng dân số, nhiều lưu vực sông tại Việt Nam đang phải đối mặt với nguy cơ suy giảm chất lượng nước do tiếp nhận lượng lớn nước thải từ sinh hoạt, sản xuất và các hoạt động kinh tế - xã hội [1, 11, 12].

Sông Luộc là một trong những tuyến sông quan trọng thuộc hệ thống sông Hồng -Thái Bình, chảy qua nhiều tỉnh đồng bằng Bắc Bộ và có vai trò quan trọng trong cấp nước sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản, tiêu thoát nước và duy trì hệ sinh thái khu vực. Đoạn sông chảy qua tỉnh Hưng Yên với chiều dài khoảng 52 km, chịu tác động đáng kể từ các hoạt động phát triển kinh tế - xã hội như sản xuất nông nghiệp, làng nghề, khu dân cư và các cơ sở sản xuất công nghiệp, làm gia tăng tải lượng các chất ô nhiễm xả vào nguồn nước và tiềm ẩn nguy cơ suy giảm chất lượng nước [2].

Trong công tác quản lý tài nguyên nước hiện nay, việc đánh giá khả năng chịu tải của môi trường nước mặt đối với các chất ô nhiễm có ý nghĩa đặc biệt quan trọng, là cơ sở khoa học để xác định mức độ tiếp nhận chất thải của nguồn nước mà vẫn bảo đảm duy trì các mục đích sử dụng nước theo quy định, đồng thời hỗ trợ cơ quan quản lý trong việc phân bổ hạn ngạch xả thải, cấp phép môi trường và kiểm soát nguồn thải [3].

Nghiên cứu này trình bày kết quả đánh giá khả năng chịu tải chất ô nhiễm của môi trường nước mặt tại sông Luộc đoạn qua tỉnh Hưng Yên theo phương pháp đánh giá trực tiếp quy định tại Thông tư 95/2025/TT-BNNMT, từ đó đề xuất một số giải pháp quản lý nhằm bảo vệ và sử dụng bền vững tài nguyên nước tại khu vực.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU TẢI CHẤT Ô NHIỄM CỦA MÔI TRƯỜNG NƯỚC MẶT

2.1. Quy trình các bước nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện như sau:

- Bước 1: Khảo sát và thu thập số liệu nền bao gồm các thông tin (lưu lượng dòng chảy của sông Q, vận tốc dòng nước, đặc điểm địa hình lòng sông; hiện trạng các thông số môi trường nước và các nguồn thải…).

- Bước 2: Áp dụng mô hình tính toán đánh giá theo Thông tư 95/2025/TT-BNNMT

- Bước 3: Xác định khả năng chịu tải một số chất ô nhiễm của đoạn sông nghiên cứu.

2.2. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là đoạn sông Luộc chảy qua địa bàn tỉnh Hưng Yên, có chiều dài khoảng 52 km, bao gồm đoạn qua tỉnh Hưng Yên cũ (khoảng 31 km, ranh giới tự nhiên giữa Hưng Yên và Thái Bình trước đây) và đoạn ranh giới tự nhiên giữa Hưng Yên - Hải Phòng hiện nay (khoảng 21 km). Đây là tuyến sông đóng vai trò quan trọng trong tưới tiêu nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản, cấp nước sinh hoạt, giao thông thủy và thoát lũ cho vùng hạ lưu [4].

Theo Quyết định số 50/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ phê duyệt quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Hồng - Thái Bình, sông Luộc được quy hoạch phục vụ các mục đích cấp nước sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp, công nghiệp và giao thông thủy [5]. Do đó, chất lượng nước của đoạn sông nghiên cứu được định hướng quản lý theo mức A của QCVN 08:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt [6], tương ứng với nguồn nước có thể sử dụng cho mục đích cấp nước sinh hoạt sau khi áp dụng biện pháp xử lý phù hợp.

2.3. Phương pháp đánh giá khả năng chịu tải

Nghiên cứu này đánh giá khả năng chịu tải của môi trường nước mặt được thực hiện theo hướng dẫn tại Thông tư 95/2025/TT-BNNMT của Bộ Nông nghiệp và Môi trường [3], phù hợp với quy định của Luật Bảo vệ môi trường 2020 và Luật Tài nguyên nước 2023 [7, 8], bao gồm 3 phương pháp: Đánh giá trực tiếp, đánh giá gián tiếp và đánh giá bằng mô hình. Do đoạn sông nghiên cứu không xác định được đầy đủ các nguồn thải xả trực tiếp (phần lớn nước thải được xả vào hệ thống kênh mương, thủy lợi nội đồng trước khi chảy vào sông Luộc), do vậy nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp đánh giá trực tiếp để tính toán khả năng chịu tải của nguồn nước. Khả năng chịu tải của từng thông số ô nhiễm (L_{tn}, kg/ngày) được xác định theo công thức:

$$L_{tn} = L_{td} - L_{nn}$$

Trong đó: L_{td} là tải lượng tối đa của thông số chất lượng nước mặt mà đoạn sông có thể tiếp nhận, được xác định theo công thức:

$$L_{td} = C_{qc} \times Q_s \times 86,4$$

L_{nn} là tải lượng hiện có của thông số trong nguồn nước, được xác định theo công thức:

$$L_{nn} = C_{nn} \times Q_s \times 86,4$$

Trong đó: C_{qc} là giá trị giới hạn của thông số theo QCVN 08:2023/BTNMT tương ứng với mục đích sử dụng nước (mg/L); C_{nn} là giá trị trung bình kết quả quan trắc chất lượng nước mặt của thông số tương ứng (mg/L); Q_s là lưu lượng dòng chảy trung bình mùa cạn của đoạn sông đánh giá (m^3/s); hệ số 86,4 là hệ số chuyển đổi thứ nguyên từ mg/L và m^3/s sang kg/ngày.

Nếu $L_{tn} > 0$, nguồn nước còn khả năng tiếp nhận thêm tải lượng ô nhiễm đối với thông số tương ứng. Ngược lại, nếu $L_{tn} < 0$, tải lượng ô nhiễm hiện có đã vượt quá khả năng chịu tải của nguồn nước.

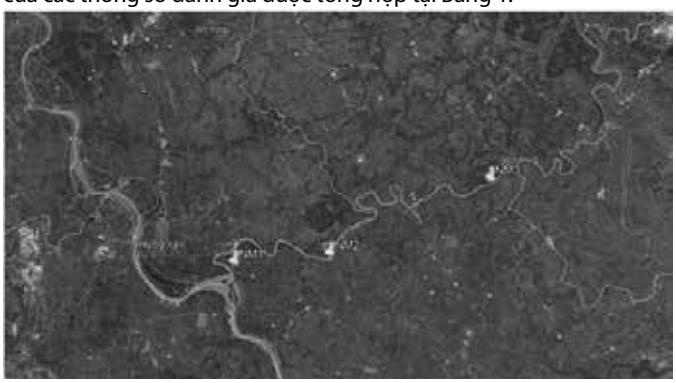
2.4. Số liệu sử dụng trong tính toán

Số liệu chất lượng nước mặt (C_{nn}) được kế thừa từ kết quả quan trắc môi trường định kỳ do Trung tâm Quan trắc Tài nguyên và Môi trường tỉnh Hưng Yên thực hiện tại 3 vị trí quan trắc trên sông Luộc (NM1 - điểm đầu sông tại xã Long Hưng; NM2 - điểm thu nước mặt của nhà máy nước Tân Tiến, xã Tiên La; NM3 - điểm thu nước mặt của nhà máy nước An Đồng, xã A Sào) trong các đợt quan trắc tháng 9, tháng 10 và tháng 12 năm 2025 [9]. Giá trị C_{nn} của từng thông số được xác định bằng trung bình cộng kết quả quan trắc của 3 vị trí trong 3 đợt nêu trên.

Lưu lượng dòng chảy Q_s được xác định trên cơ sở lưu lượng dòng chảy trung bình mùa cạn của sông Luộc tại trạm thủy văn Triều Dương (số liệu thực đo giai đoạn 1902-2025), với hệ số biến đổi C_v = 0,13-0,20, giá trị Q_s = 100 m^3/s [10]. Bảy thông số ô nhiễm đặc trưng được lựa chọn để tính toán gồm: BOD_5, COD, TSS, NH_4^+, tổng Nitơ (T-N), tổng Photpho (T-P) và tổng Coliform, phản ánh các dạng ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng, vật lý và vi sinh vật chủ yếu của nguồn nước, đồng thời phù hợp với hệ thống chỉ tiêu quản lý chất lượng nước tại QCVN 08:2023/BTNMT.

3. KHẢ NĂNG CHỊU TẢI CHẤT Ô NHIỄM CỦA MÔI TRƯỜNG NƯỚC SÔNG LUỘC

Giá trị C_{nn} (trung bình kết quả quan trắc tại 3 vị trí, 3 đợt quan trắc năm 2025) và giá trị giới hạn C_{qc} theo mức A tại QCVN 08:2023/BTNMT của các thông số đánh giá được tổng hợp tại Bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ vị trí quan trắc môi trường nước mặt sông Luộc

Bảng 1. Giá trị C_{nn} và C_{qc} của các thông số đánh giá

TT	Thông số	Đơn vị	C_{nn}	C_{qc} (mức A)
1	BOD_5	mg/L	2,3	4
2	COD	mg/L	6,7	10
3	TSS	mg/L	37	25
4	Tổng N	mg/L	2,2	0,6
5	Tổng P	mg/L	0,043	0,1
6	Tổng Coliform	MPN/100mL	3.767	1.000
7	NH_4^+	mg/L	0,047	0,3

Kết quả tại Bảng 1 cho thấy giá trị C_{nn} của các thông số BOD_5, COD, tổng Photpho và NH_4^+ đều thấp hơn giá trị giới hạn C_{qc}. Ngược lại, giá trị C_{nn} của TSS, tổng Nitơ và tổng Coliform đều cao hơn giá trị C_{qc} tương ứng, cho thấy dấu hiệu nguồn nước tiềm ẩn nguy cơ vượt khả năng chịu tải đối với các thông số này.

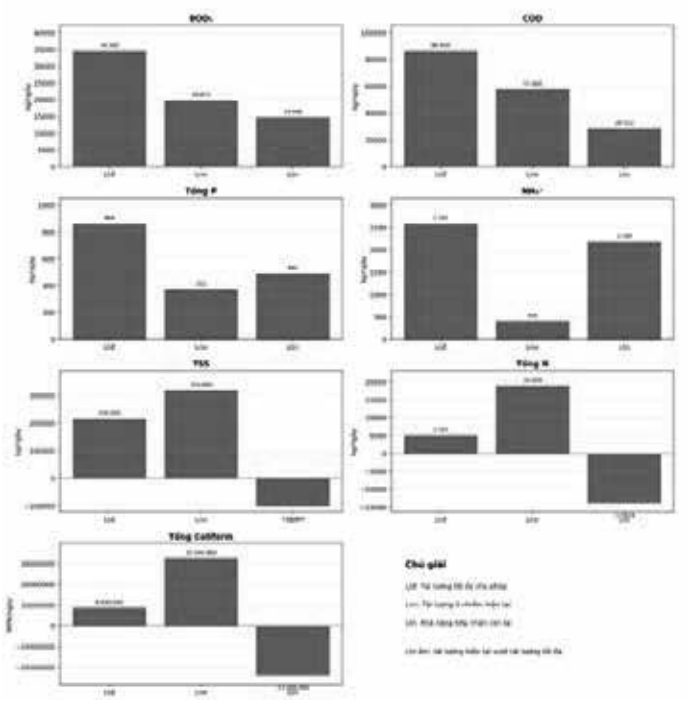
Với lưu lượng dòng chảy trung bình mùa cạn Q_s = 100 m^3/s, áp dụng công thức $L_{td} = C_{qc} \times Q_s \times 86,4$ và $L_{nn} = C_{nn} \times Q_s \times 86,4$, kết quả tính toán tải lượng tối đa (L_{td}), tải lượng hiện có (L_{nn}) và khả năng chịu tải (L_{tn}) của các thông số được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán khả năng chịu tải của sông Luộc đoạn qua Hưng Yên

TT	Thông số	L_{td} (kg/ngày)	L_{nn} (kg/ngày)	L_{tn} (kg/ngày)
1	BOD_5	34.560	19.872	14.688
2	COD	86.400	57.888	28.512
3	TSS	216.000	319.680	-103.680
4	Tổng N	5.184	19.008	-13.824
5	Tổng P	864	371,52	492
6	Tổng Coliform	8.640.000	32.546.880	-23.906.880
7	NH_4^+	2.592	406,08	2.186

Kết quả tính toán tại Bảng 2 cho thấy: Đối với các thông số BOD_5, COD, tổng Photpho và NH_4^+, giá trị L_{tn} đều dương, cho thấy nguồn nước vẫn còn khả năng tiếp nhận thêm tải lượng ô nhiễm, cụ thể còn khoảng 14.688 kg/ngày đối với BOD_5; 28.512 kg/ngày đối với COD; 492 kg/ngày đối với tổng Photpho và 2.186 kg/ngày đối với NH_4^+. Điều này cho thấy mức độ ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng phốt pho trong nguồn nước hiện vẫn nằm trong giới hạn cho phép theo mục đích sử dụng nước của đoạn sông nghiên cứu.

Ngược lại, đối với TSS, tổng Nitơ và tổng Coliform, giá trị L_{tn} đều âm (lần lượt là -103.680 kg/ngày; -13.824 kg/ngày và -23.906.880 kg/ngày), cho thấy tải lượng ô nhiễm hiện có của các thông số này đã vượt quá khả năng chịu tải của nguồn nước. Đối với TSS, nguyên nhân có thể liên quan đến xói mòn đất nông nghiệp, hoạt động khai thác cát, nạo vét và giao thông thủy trên sông. Đối với tổng Nitơ, nguồn ô nhiễm chủ yếu xuất phát từ nước thải sinh hoạt, chăn nuôi và sản xuất nông nghiệp, trong khi tổng Coliform vượt khả năng chịu tải với mức độ lớn nhất, phản ánh ảnh hưởng rõ rệt của nước thải sinh hoạt và chất thải chăn nuôi chưa được xử lý triệt để trước khi xả vào nguồn nước.



Hình 2. Khả năng chịu tải của một số chất trong nước sông Luộc

Nhìn chung, chất lượng nước của sông Luộc đoạn qua Hưng Yên đang chịu áp lực ô nhiễm đáng kể đối với các thông số TSS, tổng Nitơ và tổng Coliform, trong khi khả năng chịu tải còn lại đối với BOD_5, COD, NH_4^+ và tổng Photpho tuy còn dương nhưng không phải là vô hạn và cần được quản lý chặt chẽ để tránh nguy cơ suy giảm chất lượng nước trong tương lai.

4. ĐỀ XUẤT CÁC BIỆN PHÁP QUẢN LÝ CHẤT LƯỢNG TÀI NGUYÊN NƯỚC SÔNG LUỘC

Trên cơ sở kết quả đánh giá khả năng chịu tải cho 7 chất ô nhiễm trong sông, một số nhóm giải pháp quản lý chất lượng tài nguyên nước sông Luộc đoạn qua tỉnh Hưng Yên được đề xuất như sau:

- *Quản lý xả thải theo tải lượng ô nhiễm:* Kết quả tính toán khả năng chịu tải cần được sử dụng làm căn cứ trong cấp phép môi trường và cấp phép xả nước thải. Đối với TSS, tổng Nitơ và tổng Coliform đã vượt khả năng chịu tải, cần hạn chế phát sinh nguồn thải mới có chứa các thông số này; đối với BOD_5, COD, NH_4^+ và tổng Photpho còn khả năng tiếp nhận, việc cấp phép xả thải cần căn cứ vào tải lượng còn lại, tránh sử dụng hết khả năng chịu tải trong thời gian ngắn, từng bước chuyển từ quản lý theo nồng độ sang quản lý theo tải lượng.

- *Kiểm soát nguồn phát sinh TSS:* Tăng cường quản lý hoạt động khai thác cát, nạo vét lòng sông và xây dựng công trình ven sông; yêu cầu thu gom nước mưa chảy tràn tại các công trình

xây dựng; xây dựng hành lang cây xanh ven sông và nạo vét kênh tiêu nội đồng nhằm hạn chế bùn đất cuốn trôi vào sông.

- *Kiểm soát tải lượng Nitơ và ô nhiễm vi sinh (tổng Coliform):* Tăng tỷ lệ thu gom, xử lý nước thải sinh hoạt và chăn nuôi tại các khu dân cư ven sông; hạn chế sử dụng phân bón hóa học vượt nhu cầu cây trồng, khuyến khích canh tác hữu cơ; xây dựng vùng đệm sinh học ven sông; loại bỏ các điểm xả thải sinh hoạt trực tiếp và xây dựng hệ thống xử lý nước thải tập trung cho các cụm dân cư.

- *Duy trì khả năng chịu tải còn lại đối với BOD_5, COD, NH_4^+ và tổng Photpho:* Kiểm soát chặt chẽ nước thải công nghiệp và chế biến thực phẩm; kiểm tra định kỳ hiệu quả xử lý nước thải tại các khu, cụm công nghiệp; đánh giá lại khả năng chịu tải khi phát sinh dự án đầu tư mới; ưu tiên các dự án sản xuất sạch hơn, tiết kiệm và tuần hoàn nước.

- *Tăng cường quan trắc và phối hợp quản lý theo lưu vực:* Mở rộng mạng lưới quan trắc tại các khu vực tập trung nguồn thải, hợp lưu kênh tiêu và khu dân cư đông đúc; cập nhật định kỳ số liệu quan trắc để đánh giá lại khả năng chịu tải theo quy định của Thông tư 95/2025/TT-BNNMT; đồng thời xây dựng cơ chế phối hợp chia sẻ dữ liệu và kiểm soát nguồn thải liên tỉnh giữa Hưng Yên và TP Hải Phòng, do sông Luộc là tuyến sông liên tỉnh chịu ảnh hưởng của nhiều nguồn thải từ các địa phương khác nhau.

5. KẾT LUẬN

- Kết quả nghiên cứu đã áp dụng phương pháp đánh giá trực tiếp teo Thông tư 95/2025/TT-BNNMT để xác định khả năng chịu tải chất ô nhiễm của môi trường nước mặt tại đoạn sông Luộc dài 52 km chảy qua tỉnh Hưng Yên, sử dụng số liệu quan trắc chất lượng nước tại 3 vị trí trong năm 2025 kết hợp lưu lượng dòng chảy trung bình mùa cạn (100 m^3/s).

- Kết quả tính toán cho thấy nguồn nước vẫn còn khả năng tiếp nhận thêm tải lượng ô nhiễm đối với BOD_5 (14.688 kg/ngày), COD (28.512 kg/ngày), tổng Photpho (492 kg/ngày) và NH_4^+ (2.186 kg/ngày); trong khi TSS (-103.680 kg/ngày), tổng Nitơ (-13.824 kg/ngày) và tổng Coliform (-23.906.880 kg/ngày) đã vượt quá khả năng chịu tải của nguồn nước, chủ yếu liên quan đến nước thải sinh hoạt, chăn nuôi, sản xuất nông nghiệp chưa qua xử lý và hiện tượng xói mòn, bồi lắng bùn đất trong lưu vực.

- Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học phục vụ công tác cấp phép môi trường, quản lý xả thải theo tải lượng và xây dựng các giải pháp bảo vệ chất lượng nước sông Luộc. Trong thời gian tới, cần tiếp tục mở rộng mạng lưới quan trắc, điều tra chi tiết các nguồn thải trực tiếp và cập nhật định kỳ kết quả đánh giá khả năng chịu tải nhằm nâng cao độ chính xác và phục vụ hiệu quả công tác quản lý tài nguyên nước tại khu vực nghiên cứu.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này nhận được sự hỗ trợ từ Nhóm nghiên cứu Chất lượng môi trường đô thị và giao thông (R2026-UTC-12). Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ đó.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia (Chuyên đề tài nguyên nước), 2021.

[2] Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh Hưng Yên. Báo cáo hiện trạng và bảo vệ nguồn nước mặt tỉnh Hưng Yên, 2023.

[3] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Thông tư số 95/2025/TT-BNNMT quy định kỹ thuật đánh giá khả năng chịu tải của môi trường nước mặt đối với sông, hồ, 2025.

[4] Ủy ban nhân dân tỉnh Hưng Yên. Báo cáo tổng hợp quy hoạch tỉnh Hưng Yên thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2024.

[5] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 50/QĐ-TTg về việc phê duyệt Quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Hồng - Thái Bình thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến 2050, 2023.

[6] Bộ Tài nguyên và Môi trường. QCVN 08:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt, 2023.

[7] Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14, 2020.

[8] Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15, 2023

[9] Trung tâm Quan trắc Tài nguyên và Môi trường tỉnh Hưng Yên. Kết quả quan trắc chất lượng môi trường nước mặt sông Luộc các đợt năm 2025.

[10] Trạm thủy văn La Tiến, Triều Dương. Số liệu quan trắc thủy văn sông Luộc (Trạm Thủy văn La Tiến và trạm Thủy văn Triều Dương), 2025.

[11] Thang Le Viet, Dung Ho Minh. Assessment of surface water pollution carrying capacity and management strategies in Lam Dong Province, Vietnam. Sustainable Chemistry One World, 2025.

[12] Yazhu Wang, Jurong Wang, Xuejun Duan, Lingqing Wang. Assessment and Simulation of Water Environment Carrying Capacity in a River Basin Using System Dynamics Model. Polish Journal of Environmental Studies, https://doi.org/10.15244/pjoes/161326, 2023.

■ Ngày nộp bài: 19/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 08/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2026

Nghiên cứu lựa chọn phương pháp thiết kế phù hợp khi gia cường lớp móng trong kết cấu áo đường mềm bằng lưới địa kỹ thuật

Research on selection of an appropriate design method for geogrid-reinforced base courses in flexible pavements

> THS.NCS NGUYỄN QUỐC BẢO[2,*], TS BÙI NGỌC HƯNG[1], TS TRẦN NGỌC HUY[1]
PGS.TS NGUYỄN QUANG PHÚC[2], KS TRỊNH VIỆT HOÀNG[1]
[1]Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: ncsbao202519@lms.utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích cơ sở lựa chọn phương pháp thiết kế kết cấu áo đường mềm có lớp móng vật liệu hạt gia cường bằng lưới địa kỹ thuật (LĐKT), trên cơ sở kết quả nghiên cứu của đề tài DT25301. Ba hướng tiếp cận được xem xét gồm: (i) Phương pháp hệ số lớp theo TCCS 37:2022/TCĐBVN/AASHTO 1993, trong đó hiệu quả gia cường được lượng hóa bằng LCR, BCR hoặc TBR; (ii) phương pháp mô-đun đàn hồi theo TCCS 38:2022/TCĐBVN, trong đó tác dụng gia cường được quy đổi qua hệ số MIF; (iii) phương pháp cơ học - thực nghiệm (M-E) dùng để phân tích ứng suất, biến dạng và kiểm chứng chuyên sâu. Kết quả cho thấy không nên lựa chọn phương pháp chỉ theo mức độ "hiện đại", mà phải dựa trên mục tiêu thiết kế, dữ liệu thí nghiệm, mô hình tính và khả năng hiệu chuẩn. Bài báo cũng đề xuất quy trình lựa chọn và kiểm tra chéo nhằm bảo đảm hiệu quả gia cường được sử dụng có căn cứ, tránh tính trùng lợi ích của LĐKT.

Từ khóa: Lưới địa kỹ thuật; lớp gia cố cơ học MSL; cấp phối đá dăm; kết cấu áo đường mềm; chỉ số kết cấu; hệ số cải thiện mô-đun MIF; tỷ lệ hệ số lớp kết cấu LCR.

ABSTRACT

This paper analyzes the basis for selecting design methods for flexible pavement structures incorporating geogrid-reinforced unbound granular base layers, based on the research results of Project DT25301. Three approaches are considered: (i) The layer coefficient method in accordance with TCCS 37:2022/TCĐBVN/AASHTO 1993, in which the reinforcement benefit is quantified using the Layer Coefficient Ratio (LCR), Base Course Reduction (BCR), or Traffic Benefit Ratio (TBR); (ii) the resilient modulus method in accordance with TCCS 38:2022/TCĐBVN, in which the reinforcement effect is represented through the Modulus Improvement Factor (MIF); (iii) the Mechanistic-Empirical (M-E) method, used for stress-strain analysis and advanced verification. The results indicate that the design method should not be selected merely on the basis of how "modern" it is, but rather according to the design objectives, available test data, analytical model and calibration capability. The paper also proposes a method-selection and cross-checking procedure to ensure that the adopted geogrid reinforcement benefit is adequately justified and to avoid double-counting the benefits of geogrid reinforcement.

Keywords: Synthetic geogrids; mechanically stabilized layer MSL; crushed stone aggregate; flexible pavement; structural number; modulus improvement factor MIF; layer coefficient ratio LCR.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

LĐKT bố trí trong hoặc ngay dưới lớp vật liệu hạt không liên kết làm việc chủ yếu thông qua cơ chế khóa cài cốt liệu và giam hãm chuyển vị ngang, hình thành một vùng vật liệu hạt có ứng

xử được cải thiện, thường được gọi là lớp gia cố cơ học (MSL - Mechanically Stabilized Layer). Hiệu quả của giải pháp không chỉ phụ thuộc cường độ kéo danh nghĩa của lưới mà còn phụ thuộc độ cứng ở biến dạng nhỏ, độ bền nút, hình học ô lưới, mức độ tương thích giữa ô lưới và cấp phối cốt liệu, chất lượng nền đường, chiều dày lớp hạt và vị trí đặt lưới. Vì vậy, hiệu quả gia cường không thể được đưa vào bài toán thiết kế bằng một hệ số tăng cường chọn tùy ý [9, 10, 14].

Vấn đề cốt lõi là chuyển hiệu quả cơ học của LĐKT thành một đại lượng đầu vào tương thích với mô hình thiết kế đang được sử dụng. Nếu thiết kế theo chỉ số kết cấu SN, hiệu quả gia cường được phản ánh qua hệ số lớp thông qua tỷ lệ hệ số lớp LCR (Layer Coefficient Ratio) hoặc được đánh giá gián tiếp qua hệ số lợi ích giao thông TBR (Traffic Benefit Ratio) và hệ số giảm chiều dày lớp móng BCR (Base Course Reduction). Nếu thiết kế dựa trên mô-đun đàn hồi, hiệu quả được quy đổi thành mô-đun tương đương thông qua hệ số cải thiện mô-đun MIF (Modulus Improvement Factor). Với mô hình cơ học - thực nghiệm (M-E), hiệu quả được thể hiện qua thay đổi trường ứng suất - biến dạng, nhưng đòi hỏi nhiều số liệu đầu vào và phải hiệu chuẩn theo điều kiện địa phương [2, 3, 8, 9, 10].

2. TỔNG QUAN VÀ KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

Hệ thống tài liệu quốc tế hiện hành đã phân định tương đối rõ phạm vi của từng cách tiếp cận. AASHTO R 50-09 (2022) [9] quy định trình tự sử dụng vật liệu địa kỹ thuật để gia cường lớp móng vật liệu hạt của kết cấu áo đường mềm, trong đó nhấn mạnh rằng các hệ số hiệu năng phải được xác định từ thử nghiệm cho từng tổ hợp lưới - cốt liệu - nền cụ thể. ISO/TR 18228-5:2025 [10] tiếp cận bài toán ổn định hóa lớp vật liệu hạt theo đặc tính cường độ - biến dạng của hệ đã lắp đặt, chủ yếu hướng tới trạng thái giới hạn sử dụng và phân biệt cơ chế giam hãm ở biến dạng nhỏ với cơ chế màng chịu kéo. IRC:SP:59-2019 [12] đưa ra chỉ dẫn sử dụng vật liệu địa kỹ thuật trong kết cấu áo đường ở điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Ở Việt Nam, hai hệ thống thiết kế đang song song tồn tại: TCCS 37:2022/TCĐBVN [2] theo chỉ số kết cấu SN và TCCS 38:2022/TCĐBVN [3] theo mô-đun đàn hồi. Cả hai tiêu chuẩn này đều được xây dựng cho kết cấu áo đường mềm không có vật liệu địa kỹ thuật gia cường. Do đó, khi hồ sơ thiết kế đề xuất sử dụng LĐKT, đơn vị thiết kế và đơn vị thẩm tra thường gặp ba khó khăn: (i) Chọn đại lượng hiệu năng nào cho tương thích với phương pháp đang dùng; (ii) xác định giá trị thiết kế của đại lượng đó từ nguồn nào; (iii) kiểm tra tính hợp lý của kết quả khi hai nhánh thiết kế cho các mức lợi ích khác nhau.

3. MỤC TIÊU, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Mục tiêu của bài báo gồm: (1) Hệ thống hóa và định nghĩa nhất quán các đại lượng hiệu năng LCR, TBR, BCR và MIF; (2) dẫn xuất quan hệ giải tích giữa MIF và LCR trên cơ sở AASHTO 1993 và phân tích hệ quả của quan hệ này; (3) xây dựng tiêu chí lựa chọn phương pháp thiết kế và quy trình kiểm tra chéo; (4) chỉ ra các nội dung cần kiểm soát khi áp dụng nhằm tránh tính trùng lợi ích gia cường.

Phạm vi nghiên cứu giới hạn ở kết cấu áo đường mềm có lớp móng bằng vật liệu hạt không liên kết (cấp phối đá dăm, cấp phối thiên nhiên) được gia cường bằng LĐKT, với chức năng gia cường - ổn định hóa. Bài báo không xét chức năng phân cách/lọc và không xét LĐKT đặt trong lớp bê tông nhựa.

Nghiên cứu được thực hiện bằng phương pháp phân tích - so sánh trên cơ sở tài liệu, kết hợp với dẫn xuất giải tích và phân tích độ nhạy tham số. Trình tự thực hiện gồm 4 bước:

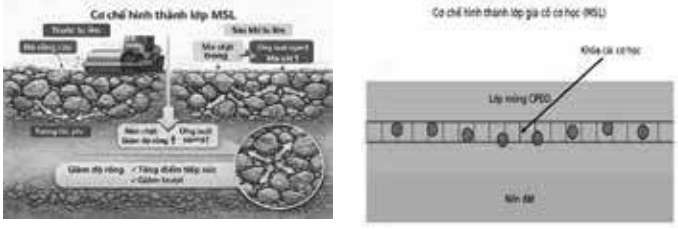
- Rà soát và đối chiếu định nghĩa của các đại lượng hiệu năng trong các tài liệu tiêu chuẩn thuộc phạm vi áp dụng, gồm AASHTO 1993, AASHTO R 50-09 (2022), ISO/TR 18228-5:2025, IRC:SP:59-2019 và hai tiêu chuẩn cơ sở đang áp dụng ở Việt Nam; loại bỏ các định nghĩa không nhất quán [2, 3, 8, 9, 10, 12].
- Dẫn xuất quan hệ giải tích giữa MIF và LCR từ phương trình liên hệ giữa hệ số lớp và mô-đun đàn hồi phục hồi của vật liệu hạt trong AASHTO 1993 [8].
- Phân tích độ nhạy của kết quả thiết kế theo hai tham số quyết định là hệ số cải thiện mô-đun MIF và chiều dày vùng gia cường hiệu quả hERZ, trong dải giá trị mô-đun lớp móng phù hợp với vật liệu hạt sử dụng ở Việt Nam.
- Xây dựng tiêu chí lựa chọn phương pháp và quy trình thiết kế kèm điểm kiểm tra chéo.

4. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ĐỊNH NGHĨA CÁC ĐẠI LƯỢNG HIỆU NĂNG

4.1. Cơ chế hình thành lớp gia cố cơ học

Lớp gia cố cơ học (Mechanically Stabilized Layer - MSL) được hình thành khi LĐKT tương tác với vật liệu hạt trong lớp móng, tạo nên cơ chế khóa cài giữa cốt liệu và mắt lưới. Cơ chế này giúp hạn chế chuyển vị ngang, tăng mô-đun đàn hồi và kéo dài tuổi thọ khai thác của mặt đường [9, 10, 14].

Cơ chế hình thành lớp MSL không chỉ dừng lại ở sự tiếp xúc đơn thuần giữa các hạt vật liệu mà là một quá trình phức hợp bao gồm tái sắp xếp cấu trúc hạt, gia tăng ma sát trong và hình thành trạng thái cân bằng ứng suất. Trong giai đoạn rải vật liệu, các hạt tồn tại ở trạng thái rời rạc với mức độ tiếp xúc thấp. Khi tiến hành lu lèn, dưới tác động của tải trọng động và tĩnh từ thiết bị lu, các hạt dịch chuyển, xoay và tái sắp xếp để đạt cấu trúc chặt chẽ hơn.

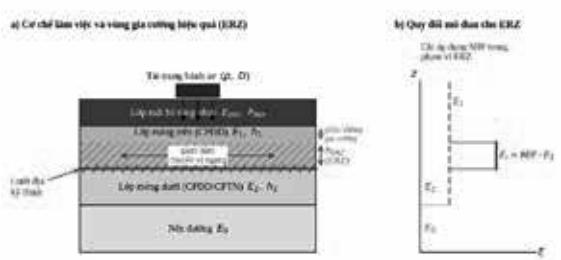


Hình 1. Cơ chế hình thành lớp gia cố cơ học MSL

4.2. Cơ chế làm việc và vùng gia cường hiệu quả

Khi vật liệu hạt được đầm chặt trên LĐKT, một phần cốt liệu xuyên và tỳ vào ô lưới, tạo khóa cơ học giữa cốt liệu và mắt lưới.

Cơ chế này chỉ phát triển trong một phạm vi hữu hạn theo chiều dày kể từ mặt phẳng đặt lưới. Phạm vi đó được gọi là vùng gia cường hiệu quả (ERZ - Effective Reinforcement Zone), đặc trưng bằng chiều dày hERZ (Hình 2a). Trong khuôn khổ mô hình một lớp tương đương, tác dụng của lưới được biểu diễn bằng việc nâng mô-đun của riêng phạm vi ERZ (Hình 2b).



Chú dẫn: h_{ERZ} phải được xác định từ thí nghiệm hoặc mô hình đã kiểm chứng; không được giả định h_{ERZ} bằng toàn bộ chiều dày lớp móng.

Hình 2. Cơ chế làm việc của LĐKT trong lớp móng vật liệu hạt (a) và sơ đồ quy đổi mô-đun cho vùng gia cường hiệu quả (b)

4.3. Định nghĩa nhất quán các đại lượng hiệu năng

Bốn đại lượng hiệu năng được sử dụng phổ biến có bản chất và điều kiện xác định khác nhau.

Bảng 1. Định nghĩa và điều kiện xác định các đại lượng hiệu năng của LĐKT

Đại lượng	Định nghĩa	Biểu thức	Phương pháp xác định	Lưu ý bắt buộc
MIF (Modulus Improvement Factor)	Tỷ số mô-đun của vùng vật liệu hạt gia cường và mô-đun của vật liệu không gia cường trong điều kiện so sánh tương đương.	$MIF = E_{gc} / E_{đc} \geq 1,0$	Thí nghiệm tấm ép cứng (TCVN 8861:2011 [5]) hoặc thí nghiệm tải trọng lặp, thực hiện đồng thời trên mẫu gia cường và mẫu đối chứng.	Mẫu gia cường và mẫu đối chứng phải cùng nền, cùng vật liệu, cùng độ chặt, cùng chiều dày và cùng phương pháp thí nghiệm; chỉ áp dụng cho phạm vi ERZ.
LCR (Layer Coefficient Ratio)	Tỷ số hệ số lớp kết cấu của vật liệu hạt gia cường và hệ số lớp của vật liệu không gia cường.	$LCR = a_r / a \geq 1,0$	Suy ra từ MIF theo công thức (4), hoặc xác định từ thử nghiệm kết cấu quy mô lớn.	LCR không phải hằng số của lưới; giá trị phụ thuộc mô-đun lớp móng đối chứng; không định nghĩa LCR theo tỷ số chỉ số kết cấu SN.
TBR (Traffic Benefit Ratio)	Tỷ số số lần tác dụng tải trọng mà kết cấu gia cường chịu được so với kết cấu đối chứng, tại cùng một trạng thái giới hạn.	$TBR = N_{gc} / N_{đc} \geq 1,0$	Thử nghiệm kết cấu quy mô lớn, thử nghiệm gia tốc hoặc đoạn thử nghiệm hiện trường có kết cấu đối chứng [5].	Phải nêu rõ trạng thái giới hạn dùng làm mốc so sánh (chiều sâu vệt hằn hoặc mức phục vụ); không được xác định từ thí nghiệm hằn lún vệt bánh xe của hỗn hợp bê tông nhựa.
BCR (Base Course Reduction)	Mức giảm chiều dày lớp móng của kết cấu gia cường so với kết cấu đối chứng, khi duy trì cùng tuổi thọ hoặc cùng mức phục vụ.	$BCR = (h_{đc} - h_{gc})/h_{đc}$	Như đối với TBR.	Phải giữ nguyên một định nghĩa và một chiều bất đẳng thức trong toàn bộ hồ sơ; không được coi BCR là phép chia chiều dày độc lập với bài toán kết cấu.
Chú thích: Chỉ số "gc" chỉ phương án gia cường, chỉ số "đc" chỉ phương án đối chứng.				

4.4. Điều kiện tương thích về loại mô-đun

Một điểm cần đặc biệt lưu ý là sự khác biệt bản chất giữa hai loại mô-đun đang được sử dụng song song. Mô-đun đàn hồi E trong hệ thống thiết kế của Việt Nam được xác định bằng tấm ép cứng dưới tải trọng tĩnh theo TCVN 8861:2011 [5] hoặc bằng cần đo võng Benkelman theo TCVN 8867:2011 [6] cho mô-đun đàn hồi chung của kết cấu. Trong khi đó, mô-đun đàn hồi phục hồi MR trong hệ thống AASHTO được xác định bằng thí nghiệm ba trục tải trọng lặp và phụ thuộc trạng thái ứng suất [8].

Do 2 đại lượng này được xác định bằng hai chế độ tải trọng khác nhau, hệ số MIF xác định từ MR không được thay trực tiếp vào E trong tính toán theo TCCS 38:2022/TCĐBVN và ngược lại. Yêu cầu bắt buộc là: Hệ số MIF phải được xác định bằng cùng một loại thí nghiệm với loại mô-đun được sử dụng trong bài toán thiết kế.

5. QUAN HỆ ĐỊNH LƯỢNG GIỮA MIF VÀ LCR

5.1. Dẫn xuất quan hệ

Trong AASHTO 1993 [8], hệ số lớp của lớp móng vật liệu hạt không liên kết được liên hệ với mô-đun đàn hồi phục hồi bằng phương trình:

$$a = 0,249 \cdot \lg(E) - 0,977 \quad (1)$$

Trong đó: a là hệ số lớp của vật liệu hạt không gia cường; E là mô-đun đàn hồi phục hồi của lớp móng, tính bằng psi (1 MPa = 145,04 psi).

Khi lớp móng được gia cường, mô-đun của vùng ERZ được quy đổi theo:

$$E_r = MIF \cdot E \quad (2)$$

Thay (2) vào (1) và khai triển logarit của tích, hệ số lớp của vùng gia cường là:

$$a_r = 0,249 \cdot \lg(MIF \cdot E) - 0,977 = a + 0,249 \cdot \lg(MIF)$$

Từ đó rút ra hai hệ thức cơ bản:

$$\Delta a = a_r - a = 0,249 \cdot \lg(MIF) \quad (3)$$

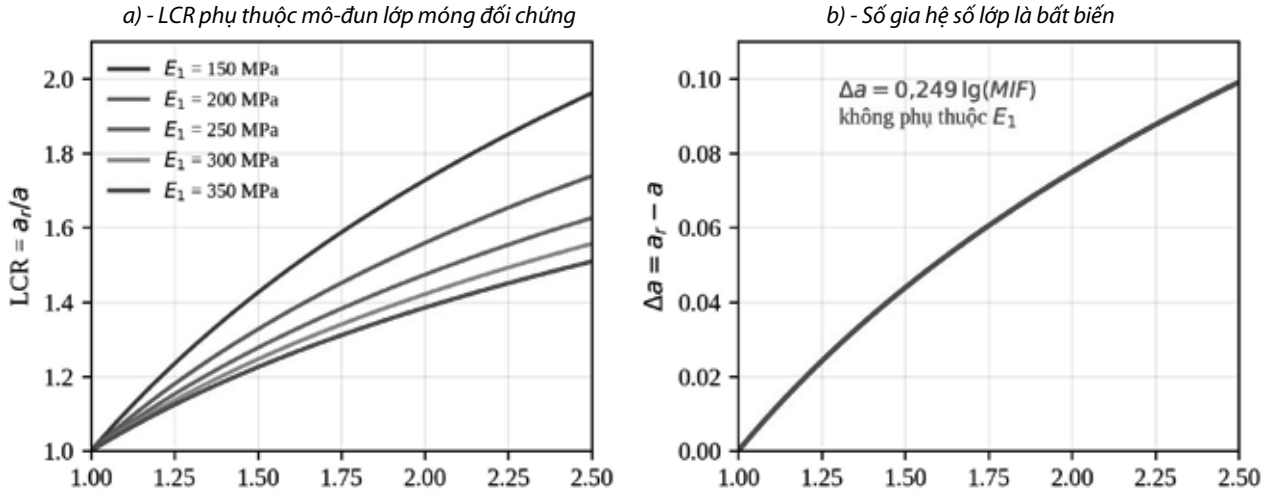
$$LCR = a_r / a = 1 + 0,249 \cdot \lg(MIF) / a \quad (4)$$

5.2. Hệ quả LCR không bất biến, Δa bất biến

So sánh (3) và (4) cho thấy một kết quả có ý nghĩa quan trọng đối với công tác lập tiêu chuẩn: Số gia hệ số lớp Δa chỉ phụ thuộc MIF, trong khi tỷ lệ LCR còn phụ thuộc hệ số lớp a của vật liệu đối chứng, tức phụ thuộc mô-đun của lớp móng chưa gia cường. Nói cách khác, cùng một loại lưới đặt trong cùng một loại cấp phối nhưng với chất lượng lớp móng đối chứng khác nhau sẽ cho các giá trị LCR khác nhau.

Bảng 2. Giá trị LCR và Δa tính theo AASHTO 1993 ứng với các mức MIF và mô-đun lớp móng đối chứng

Mô-đun lớp móng đối chứng E (MPa)	Hệ số lớp đối chứng a	LCR MIF = 1,2	LCR MIF = 1,5	LCR MIF = 2,0	LCR MIF = 2,5
150	0,1031	1,191	1,425	1,727	1,961
200	0,1342	1,147	1,327	1,559	1,739
250	0,1583	1,125	1,277	1,474	1,626
300	0,1780	1,111	1,246	1,421	1,557
350	0,1947	1,101	1,225	1,385	1,509
$\Delta a = a_r - a$ (mọi giá trị E)	-	0,0197	0,0438	0,0750	0,0991



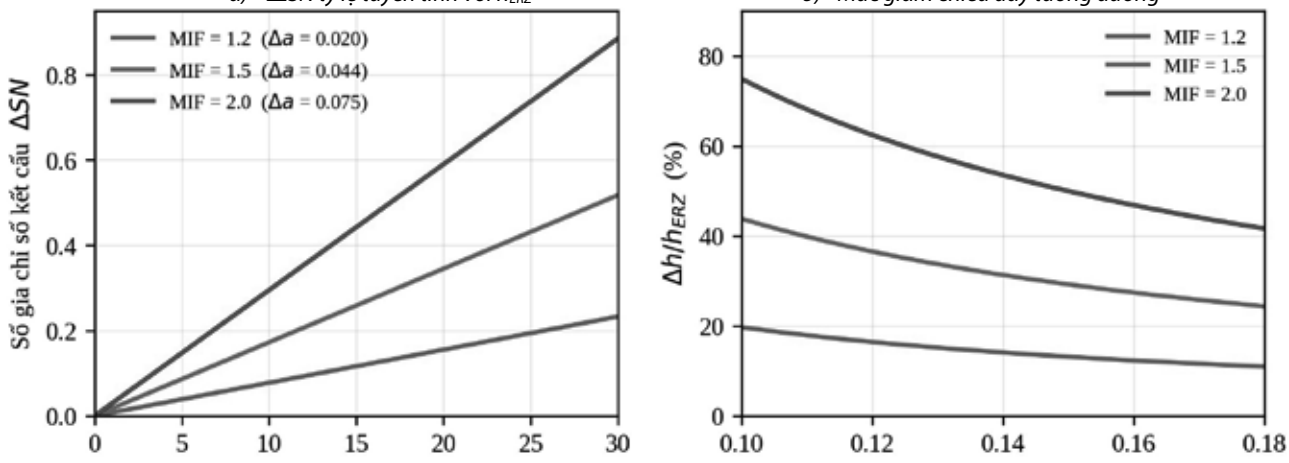
Hình 3a. Quan hệ giữa hệ số cải thiện mô-đun MIF với tỷ lệ hệ số lớp LCR (a) và với số gia hệ số lớp Δa (b)

5.3. Độ nhạy của kết quả thiết kế theo chiều dày vùng gia cường hiệu quả

Trong phương pháp chỉ số kết cấu, đóng góp kết cấu tăng thêm do gia cường được xác định theo:

$$\Delta SN = \Delta a \cdot m \cdot h_{ERZ} \quad (5)$$

Trong đó: m là hệ số thoát nước của lớp móng; hERZ là chiều dày vùng gia cường hiệu quả, tính bằng inch theo hệ đơn vị của AASHTO 1993. Khi áp dụng theo TCCS 37:2022/TCĐBVN phải sử dụng đúng hệ đơn vị mà tiêu chuẩn quy định [2, 8].



Hình 3b. Ảnh hưởng của chiều dày vùng gia cường hiệu quả tới số gia chỉ số kết cấu (a) và mức giảm chiều dày tương đương (b)

Mức giảm chiều dày lớp móng tương đương, xác định từ điều kiện bảo toàn chỉ số kết cấu, là:

$$\Delta h / h_{ERZ} = \Delta a / a \quad (6)$$

Từ công thức (5) và Hình 3a, ΔSN tỷ lệ tuyến tính với h_{ERZ}.

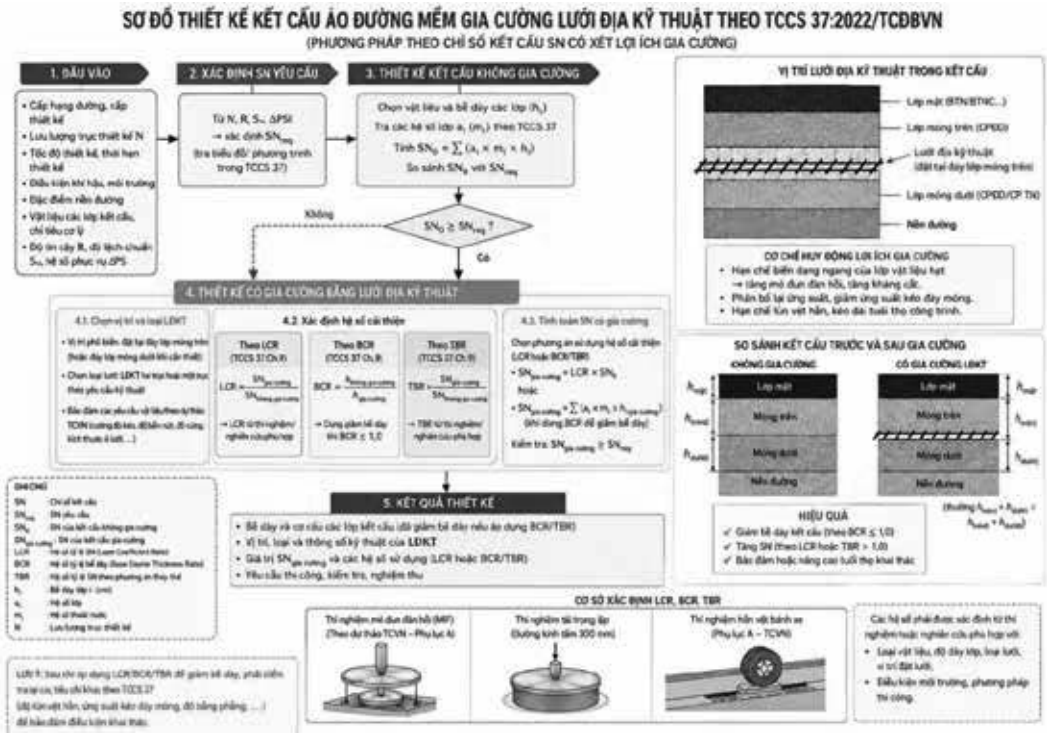
Hình 3b cho thấy mức giảm chiều dày tương đương phụ thuộc mạnh vào hệ số lớp của vật liệu đối chứng. Kết quả này một lần nữa khẳng định hiệu quả gia cường phải được đánh giá trong tương quan với chất lượng của kết cấu đối chứng, không phải như một thuộc tính độc lập của sản phẩm lưới.

6. PHÂN TÍCH CÁC PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ

6.1. TCCS 37:2022/TCĐBVN kết hợp LCR, BCR hoặc TBR

TCCS 37 sử dụng cách tiếp cận hệ số lớp/số kết cấu, tương thích về nguyên lý với AASHTO 1993. Trước tiên xác định số kết cấu yêu cầu SNyc từ giao thông thiết kế, điều kiện nền, độ tin cậy và thời hạn thiết kế. Đối với lớp vật liệu hạt không gia cường, đóng góp kết cấu được xác định từ hệ số lớp, chiều dày và các hệ số liên quan. Khi có LĐKT, có thể tăng hệ số lớp của phần ERZ bằng LCR hoặc đánh giá lợi ích theo BCR/TBR [2, 8, 9].

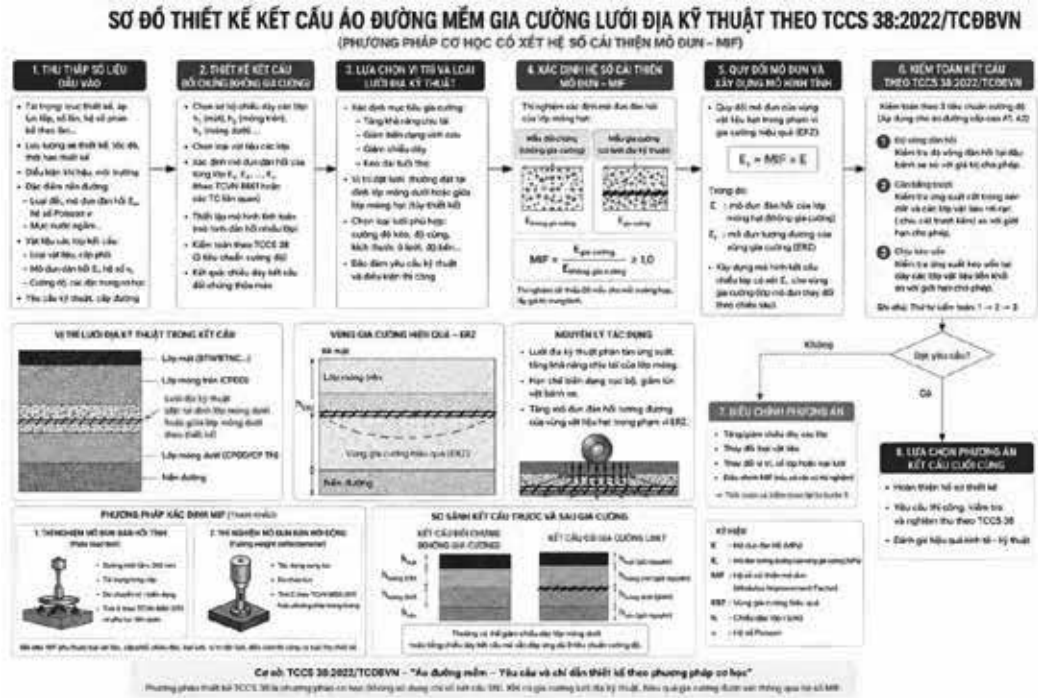
Trong tính toán, nếu ERZ chỉ chiếm một phần chiều dày lớp móng thì nên tách đóng góp kết cấu của vùng gia cường và phần không gia cường thay vì nhân LCR cho toàn bộ lớp.



Hình 4. Thiết kế KCAĐ mềm gia cường LĐKT theo TCCS37:2022/TCĐBVN

6.2. TCCS 38:2022/TCĐBVN kết hợp hệ số MIF

Cách tiếp cận này biểu diễn hiệu quả LĐKT thông qua sự tăng độ cứng của lớp vật liệu hạt. Mô-đun của vùng gia cường được thay bằng Er = MIF × E và đưa vào mô hình tính theo TCCS 38.

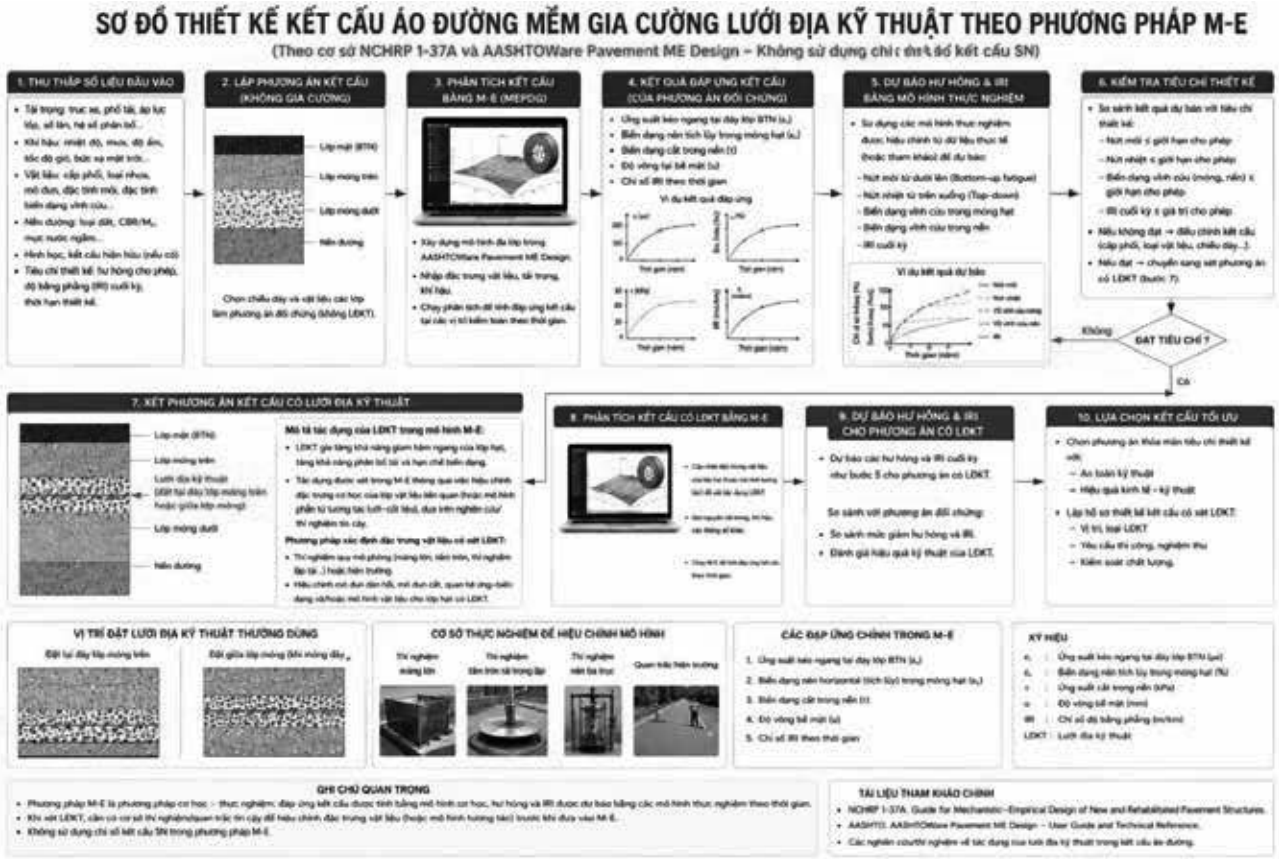


Hình 5. Thiết kế KCAĐ mềm gia cường LĐKT theo TCCS38:2022/TCĐBVN

Ưu điểm chính là liên hệ trực tiếp với đại lượng cơ học có thể đo. Tuy nhiên, MIF là hệ số của hệ "lưới - cốt liệu - nền - chiều dày - trạng thái đầm chặt - điều kiện tải". Do đó, khi xác định MIF phải bảo đảm phương án gia cường và đối chứng có cùng nền, vật liệu, độ chặt, chiều dày và điều kiện thí nghiệm.

6.3. Phương pháp cơ học - thực nghiệm (M-E)

Phương pháp M-E mô hình hóa kết cấu nhiều lớp để xác định các đáp ứng cơ học như biến dạng kéo tại đáy lớp bê tông nhựa, biến dạng nén trên nền, ứng suất và biến dạng trong lớp hạt; sau đó liên hệ các đáp ứng với mô hình hư hỏng thực nghiệm. Với LĐKT, có thể mô hình hóa gián tiếp bằng thay đổi mô-đun vùng gia cường hoặc bằng mô hình tương tác nâng cao khi có đủ tham số [13].



Hình 6. Thiết kế KCAĐ mềm gia cường LĐKT theo M - E

7. TIÊU CHÍ LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP VÀ QUY TRÌNH THIẾT KẾ ĐỀ XUẤT

7.1. Nguyên tắc và tiêu chí lựa chọn

Không có một phương pháp duy nhất tối ưu cho mọi trường hợp. Vì vậy, nguyên tắc lựa chọn là bảo đảm sự tương thích giữa đại lượng hiệu năng và mô hình thiết kế.

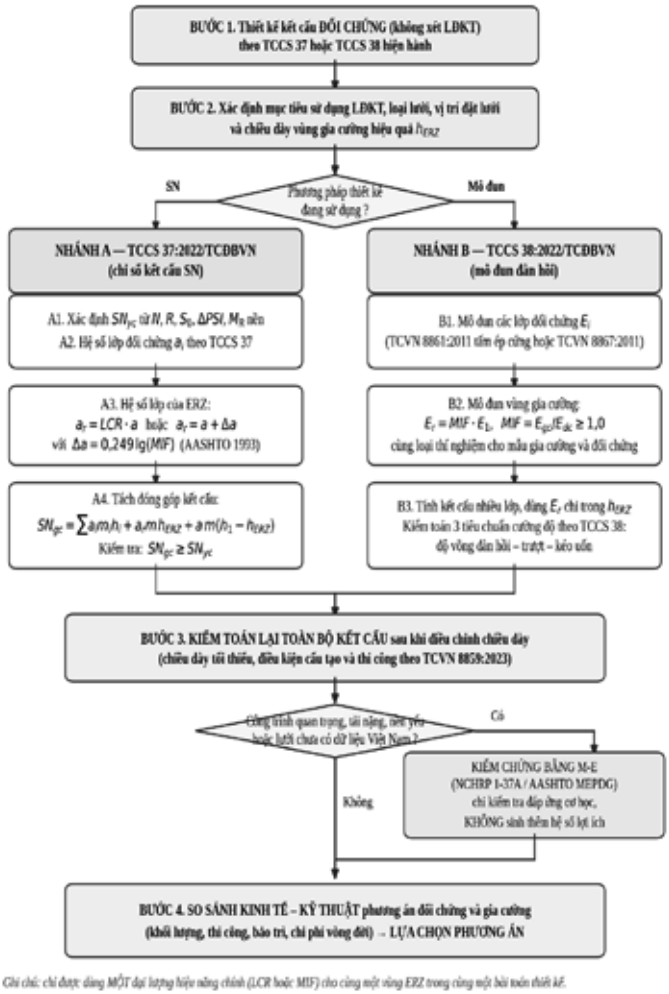
Bảng 3. So sánh ba hướng tiếp cận thiết kế kết cấu áo đường mềm có lớp móng gia cường bằng LĐKT

Tiêu chí	TCCS 37 + LCR (hoặc Δa)	TCCS 38 + MIF	M-E (kiểm chứng)
Đại lượng thiết kế chính	Chỉ số kết cấu SN, hệ số lớp	Mô-đun đàn hồi của các lớp	Ứng suất, biến dạng, hư hỏng tích lũy
Số liệu LĐKT cần có	Δa hoặc LCR (suy ra từ MIF theo CT (4))	MIF xác định trực tiếp	Mô-đun vùng gia cường và mô hình hư hỏng đã hiệu chuẩn
Mức độ phản ánh cơ chế	Gián tiếp, thông qua hệ số lớp	Trực tiếp, thông qua độ cứng	Trực tiếp nhất, nhưng phụ thuộc mô hình hư hỏng
Thuận lợi cho tối ưu chiều dày	Thuận lợi, theo công thức (6)	Có thể, qua tính lặp	Có thể, nhưng tốn kém
Nhu cầu hiệu chuẩn theo điều kiện Việt Nam	Trung bình	Trung bình - cao	Rất cao
Hạn chế chính	LCR phụ thuộc kết cấu đối chứng; phải tách riêng ERZ	MIF phụ thuộc toàn hệ; phải cùng loại thí nghiệm với mô-đun thiết kế	Phần mềm M-E hiện hành không có mô hình mô phỏng trực tiếp LĐKT
Vai trò đề xuất trong giai đoạn hiện nay	Phương pháp thiết kế chính khi hồ sơ theo SN	Phương pháp thiết kế chính khi hồ sơ theo mô-đun	Chỉ dùng kiểm chứng, không sinh thêm hệ số lợi ích

Vì vậy, M-E chỉ nên được sử dụng để kiểm tra tính hợp lý của trường ứng suất - biến dạng, độ võng và nguy cơ hư hỏng; kết quả kiểm chứng chỉ được dùng để giữ nguyên hoặc giảm hệ số hiệu năng, không được dùng để tăng [13].

7.2. Quy trình thiết kế đề xuất

Quy trình đề xuất được trình bày trên Hình 7, gồm 4 bước chính với một điểm phân nhánh theo phương pháp thiết kế đang sử dụng và một điểm kiểm tra chéo bằng M-E.



Hình 7. Quy trình thiết kế kết cấu áo đường mềm có lớp móng gia cường bằng LĐKT

8. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

- Việc lựa chọn phương pháp thiết kế lớp móng gia cường bằng LĐKT phải bảo đảm sự tương thích giữa đại lượng mô tả hiệu quả gia cường và mô hình thiết kế kết cấu áo đường đang sử dụng. Bốn đại lượng LCR, TBR, BCR và MIF có bản chất và điều kiện xác định khác nhau và được định nghĩa nhất quán.

- Trên cơ sở phương trình liên hệ giữa hệ số lớp và mô-đun đàn hồi phục hồi của AASHTO 1993, bài báo đã dẫn xuất được quan hệ giải tích giữa MIF và LCR: $\Delta a = 0{,}249 \cdot \lg(MIF)$ và $LCR = 1 + 0{,}249 \cdot \lg(MIF)/a$.

- Hệ quả quan trọng nhất là LCR không phải hằng số đặc trưng của lưới: Với cùng MIF = 1,5, LCR giảm từ 1,425 xuống 1,225 khi mô-đun lớp móng đối chứng tăng từ 150 MPa lên 350 MPa. Ngược lại, số gia Δa là bất biến đối với mô-đun lớp móng đối chứng. Do đó, kiến nghị quy định theo Δa thay vì theo LCR trong tiêu chuẩn.

- Chiều dày vùng gia cường hiệu quả hERZ là biến nhạy nhất của bài toán: Số gia chỉ số kết cấu tỷ lệ tuyến tính với h_{ERZ}.

- Phương pháp M-E nên được xem là công cụ kiểm chứng trong giai đoạn hiện nay.

- Kiến nghị tiêu chuẩn Việt Nam về gia cường lớp móng bằng LĐKT cho phép hai nhánh thiết kế TCCS 37 + Δa và TCCS 38 + MIF.

Lời cảm ơn: Tác giả và nhóm nghiên cứu trân trọng cảm ơn Viện khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, Bộ môn Đường bộ, Khoa Công trình Trường ĐH GTVT đã hỗ trợ trong suốt quá trình thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải. Nghiên cứu lựa chọn vật liệu địa kỹ thuật tổng hợp dạng lưới trong lớp móng của kết cấu mặt đường mềm ở Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài DT25301, 2026.

[2] Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế theo phương pháp AASHTO 1993. TCCS 37:2022/TCĐBVN, 2022.

[3] Áo đường mềm - Yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế. TCCS 38:2022/TCĐBVN, 2022.

[4] Gia cường móng đường bằng LĐKT tổng hợp - Thiết kế, thi công và nghiệm thu. Dự thảo TCVN, 2026.

[5] Áo đường mềm - Xác định mô-đun đàn hồi của nền đất và các lớp kết cấu áo đường bằng phương pháp sử dụng tấm ép cứng - TCVN 8861:2011, 2011.

[6] Áo đường mềm - Xác định mô-đun đàn hồi chung của kết cấu bằng cần đo võng Benkelman. TCVN 8867:2011, 2011.

[7] Lớp móng cấp phối đá dăm trong kết cấu áo đường - Thi công và nghiệm thu. TCVN 8859:2023, 2023.

[8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC, USA: AASHTO, 1993.

[9] Standard Practice for Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base Course of Flexible Pavement Structures. AASHTO R 50-09. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2022.

[10] Design Using Geosynthetics - Part 5: Stabilization. ISO/TR 18228-5:2025. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2025.

[11] Design Using Geosynthetics - Part 2: Separation. ISO/TR 18228-2:2021. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.

[12] Guidelines for Use of Geosynthetics in Road Pavements and Associated Works. IRC:SP:59-2019, Indian Roads Congress, New Delhi, India, 2019.

[13] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Rep., NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 2004.

[14] Federal Highway Administration (FHWA). Geotechnical Aspects of Pavements - Reference Manual. Rep. FHWA NHI-05-037, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 2006.

■Ngày nhận bài: 13/10/2026 ■Ngày sửa bài: 23/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/10/2026

Nghiên cứu kiểm soát hình học mặt cắt đầu dầm trước khi hàn liên tục hóa cầu vòm thép dưới tác động của nhiệt độ

Study on geometric control of girder-end cross sections before continuity welding of steel arch bridges under thermal effects

> KS HÀ QUANG ĐẠT[1], PGS.TS KHÚC ĐĂNG TÙNG[2,*]
[1]Công ty TNHH Chodai & Kiso-Jiban Việt Nam
[2]Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: tungkd@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Hàn hợp long liên tục hóa cầu vòm thép đòi hỏi hai mặt cắt đầu dầm tương thích về sáu bậc tự do trong khi biến dạng nhiệt diễn ra liên tục. Bài báo định lượng sai lệch hình học tại khe hợp long và xác định kích thước đoạn dầm chêm bằng mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) theo giai đoạn thi công của một liên cầu vòm thép Lohse ba nhịp 145 m có sườn vòm nghiêng 57°, với sáu trạng thái nhiệt của Hà Nội và ba mức chênh lệch nhiệt độ giữa vòm và dầm. Kết quả cho thấy sai lệch khoảng hở dọc cầu và độ vênh giữa mép trên, mép dưới khe hợp long vượt dung sai; khoảng hở không thể khử bằng đối trọng hay kích, còn độ vênh được bù bằng góc vát đoạn chêm. Lệch mép do xoắn chỉ khoảng 4% giới hạn. Bài báo đề xuất công thức hồi quy, toán đồ và quy trình sáu bước xác định chiều dài, góc vát đoạn chêm theo nhiệt độ thực đo.

Từ khóa: Cầu vòm thép Lohse; liên tục hóa; tác động nhiệt độ; không ứng suất; đoạn dầm chêm.

ABSTRACT

Closure welding of continuous steel arch bridges requires the two girder-end cross sections to be compatible in six degrees of freedom while thermal deformation evolves continuously. This paper quantifies the geometric deviations at the closure gap and sizes the closure segment using a construction-stage finite element (FE) model of a three-span 145 m Lohse steel arch bridge unit with arch ribs inclined at 57°, considering six thermal states in Hanoi and three arch-girder temperature differences. The longitudinal gap deviation and the top-to-bottom gap difference, or warp, exceed the tolerances; the former cannot be eliminated by counterweighting or jacking, whereas the latter is compensated by the bevel angle of the closure segment. The torsion-induced edge misalignment is only about 4% of the limit. Regression formulas, nomograms and a six-step procedure are proposed to determine the length and bevel angle of the closure segment from the measured temperature.

Keywords: Lohse steel arch bridge; closure welding; thermal effects; unstressed method; closure segment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu vòm thép ngày càng được lựa chọn cho các công trình vượt sông tại đô thị lớn, trong đó bước hợp long quyết định chất lượng hình học của toàn công trình [1, 2]. Với cầu vòm Lohse lắp dựng trên đà giáo, sau khi tháo đà giáo mỗi nhịp làm việc như dầm giản đơn trên gối tạm cho đến khi hàn liên tục hóa. Theo TCVN 10307:2014 và TCVN 10309:2014, hai đầu dầm chỉ được hàn nối khi sai lệch vị trí và góc xoay nằm trong giới hạn cho phép; cưỡng ép lắp ghép sẽ gây phát sinh ứng suất dư và làm tăng nguy cơ hư hỏng mỏi tại mối hàn. Phương pháp trạng thái không ứng suất (TTKƯS) đã được ứng dụng để hợp long chính xác cầu vòm thép [2, 3].

Nhiệt độ là yếu tố khó kiểm soát nhất khi hợp long: biên độ nhiệt bề mặt dầm hộp thép vượt xa biên độ nhiệt không khí [4] và có thể quy đổi từ số liệu khí tượng [5]; sườn vòm và dầm chênh lệch nhiệt độ đáng kể, gây biến dạng không đồng đều trong thi công [6, 7]. Các nghiên cứu về hợp long chủ yếu xác định nhiệt độ hợp long hợp lý, kiểm soát cao độ, khoảng hở và lực kích, đối trọng hiệu chỉnh [8, 9]; góc xoay đầu dầm, nhất là góc xoắn ở cầu vòm sườn nghiêng, ít được xét cùng tiêu chí lắp ghép mối hàn và chưa được chuyển thành kích thước gia công đoạn dầm chêm.

Bài báo hướng tới ba mục tiêu: (i) định lượng sáu thành phần sai lệch tương đối giữa hai mặt cắt đầu dầm so với dung sai lắp ghép; (ii) đánh giá nguy cơ xoắn đầu dầm và hiệu quả hiệu chỉnh bằng gia tải hoặc kích; (iii) xác định kích thước đoạn dầm chêm theo trạng thái nhiệt dưới dạng công thức, toán đồ và quy trình áp dụng tại hiện trường.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Nhiệt độ tác động lên kết cấu

Trường nhiệt độ của cầu thép chịu chi phối của bức xạ mặt trời, đối lưu và bức xạ sóng dài giữa bề mặt kết cấu với môi trường [5, 10]. Nhiệt độ bề mặt bản thép *Ts* được xác định từ phương trình cân bằng năng lượng bề mặt ở trạng thái tựa ổn định, bỏ qua dòng nhiệt vào trong bản thép, theo (1)-(6) [5, 10]. Theo TCVN 11823:2017, nhiệt độ phân bố đều *TU* tác động lên kết cấu được tính theo (7).

$$\alpha I_0 - \varepsilon C_0(273{,}15 + T_s)^4 + I_g - h_c(T_s - T_a) = 0 \quad (1)$$

$$I_g = \varepsilon C_0(273{,}15 + T_a)^4 \quad (2)$$

$$h_c = 5{,}99 + 4v \quad (3)$$

$$I_0 = Y_s I_b + Y_i I_d \quad (4)$$

$$Y_s = \begin{cases} -0{,}403C + 1, C < 0{,}5 \\ -1{,}283C + 1{,}440, C \geq 0{,}5 \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_i = \begin{cases} 0{,}657C + 1, C < 0{,}5 \\ 4{,}653C - 0{,}998, C \geq 0{,}5 \end{cases} \quad (6)$$

$$TU = T_s - T_{erection} \quad (7)$$

Trong đó, α là hệ số hấp thụ bức xạ của lớp sơn phủ; ε là hệ số phát xạ; $C_0 = 5{,}67\times10^{-8}$ W/(m^2·K^4) là hằng số Stefan-Boltzmann; T_s, T_a là nhiệt độ bề mặt thép và nhiệt độ không khí (°C); I_0 là tổng cường độ bức xạ tới bề mặt, gồm bức xạ trực tiếp I_b và tán xạ I_d (W/m^2); I_g là bức xạ sóng dài từ bầu trời; h_c là hệ số đối lưu theo tốc độ gió v (m/s); Y_s, Y_i là hệ số hiệu chỉnh bức xạ theo lượng mây che phủ C; $T_{erection}$ là nhiệt độ cơ sở, lấy theo nhiệt độ trung bình năm. Dùng T_s của bản thép chịu bức xạ trực tiếp để xác định *TU* là giả thiết thiên về an toàn [10]. Sườn vòm lộ thiên thường nóng hơn dầm hộp được bản mặt cầu che chắn; chênh lệch ΔT giữa vòm và dầm làm đỉnh vòm vồng lên kéo dầm vồng theo, còn dầm lạnh hơn làm khoảng hở hợp long giảm.

2.2. Lý thuyết trạng thái không ứng suất

Theo lý thuyết TTKUS, khi chiều dài và độ cong không ứng suất của từng phần tử được bảo đảm, nội lực và hình học ở trạng thái hoàn thành không phụ thuộc trình tự thi công; quan hệ cân bằng theo giai đoạn biểu diễn theo (8) [2, 3]. Đoạn dầm chêm chính là phần tử có chiều dài không ứng suất cần lựa chọn: kích thước của nó phải khớp với hình học thực của khe tại nhiệt độ lắp đặt để lắp mà không cần lực cưỡng bức; đối trọng hoặc kích chỉ đóng vai trò phụ trợ.

$$[K]\{\delta\} = \{P\} + \{L_0\} \quad (8)$$

Trong đó, $[K]$ là ma trận độ cứng; $\{\delta\}$ là vectơ chuyển vị nút; $\{P\}$ là vectơ tải trọng ngoài; $\{L_0\}$ là vectơ tải trọng tương đương do thay đổi trạng thái không ứng suất của các phần tử.

2.3. Hệ tiêu chí kiểm soát

Điều kiện lắp ghép được đánh giá bằng sai lệch tương đối giữa hai mặt cắt đối diện. Với dầm hộp cao hd = 5,0 m và sườn vòm nghiêng 57°, các góc xoay tương đối được quy đổi thành sai lệch tại mép mặt cắt theo (9)-(12); hệ tiêu chí kiểm soát lập theo Bảng 1.

$$m = h_d \tan(\delta\theta_X) \quad (9)$$

$$\delta_{x,\theta Y} = sh_d \cos(57°) \tan(\delta\theta_Y) \quad (10)$$

$$\delta_{x,\theta Z} = h_d \sin(57°) \tan(\delta\theta_Z) \quad (11)$$

$$\delta_X = \delta_{x,\theta Y} - \delta_{x,\theta Z} \quad (12)$$

Trong đó: $\delta\theta_X$, $\delta\theta_Y$, $\delta\theta_Z$ là góc xoay tương đối quanh trục X (dọc cầu), Y (thẳng đứng), Z (ngang cầu); m là lệch mép do góc xoắn; δ_X là độ vênh theo phương dọc cầu; $s = \pm1$ theo chiều nghiêng của dầm; t là chiều dày bản mỏng hơn.

Bảng 1. Hệ tiêu chí kiểm soát hình học trước khi hợp long

Hạng mục	Ký hiệu	Giới hạn	Nguồn
Sai lệch cao độ đứng đầu dầm	ΔY	10 mm	TCVN 10307:2014, B9 mục 2
Sai lệch tim tuyến phương ngang	ΔZ	6 mm	D6.5.1.5. TCVN 10309:2014
Sai lệch khoảng hở dọc cầu	ΔX	10 mm	TCVN 10307:2014, B9 mục 8
Chênh khe hở mép trên - mép dưới	Δd	2 mm	D6.3.4. TCVN 10309:2014 D5.3.4. AWS D1.5:2020
Lệch mép bản cánh và bản bụng	m	min(0,1t ; 3 mm)	D3.3. TCVN 10309:2014 D5.3.3. AWS D1.5:2020
Sai lệch góc rãnh hàn (vát mép)	$\Delta\alpha$	+10° / -5°	TCVN 10309:2014

3. MÔ HÌNH HÓA PHÂN TÍCH

3.1. Đối tượng nghiên cứu và kịch bản nhiệt độ

Tại Việt Nam, cầu vòm thép sườn nghiêng đã được áp dụng cho các nhịp vượt sông lớn như cầu Bình Lợi, cầu Nguyễn Hoàng, cầu Trần Hưng Đạo; dạng kết cấu này bất lợi khi hợp long do dầm liên tục dài tích lũy biến dạng nhiệt lớn và sườn vòm nghiêng gây lực xô ngang lệch tâm. Đối tượng nghiên cứu là một liên ba nhịp 145 m gồm hai dầm chủ hộp thép cao 2,6÷5,0 m treo vào sườn vòm cao 25 m bằng 12 thanh treo mỗi bên; hai sườn vòm nghiêng vào tim cầu 57° so với phương ngang; dầm ngang cao 2,8 m và dầm dọc phụ đỡ bản mặt cầu BTCT đúc sẵn liên hợp dày 0,26 m.

Ba kịch bản thời tiết đại diện từ số liệu khí hậu Hà Nội [11] gồm: kịch bản 1 nắng gắt, gió nhẹ; kịch bản 2 nóng, nhiều mây, gió vừa; kịch bản 3 lạnh, gió tương đối mạnh; mỗi kịch bản có hai trạng thái nhiệt độ bề mặt lớn nhất và nhỏ nhất (Bảng 2) với nhiệt độ cơ sở 23,9°C (QCVN02:2022/BXD). Dầm thép sơn xám với α = 0,6, ε = 0,8 [12]; lượng mây lần lượt 0%, 90%, 30%; tốc độ gió 1,5; 8,3 và 12,8 m/s; I_b = 750 W/m^2, I_d = 150 W/m^2 cho kịch bản 1, 2, còn kịch bản 3 không có bức xạ. Mỗi trạng thái tổ hợp với ΔT = 5, 10 và 15°C: ở kịch bản 1, 2, sườn vòm nhận *TU*, dầm chủ nhận *TU* - ΔT; ở kịch bản 3, dầm chủ nhận *TU*, sườn vòm nhận *TU* + ΔT.

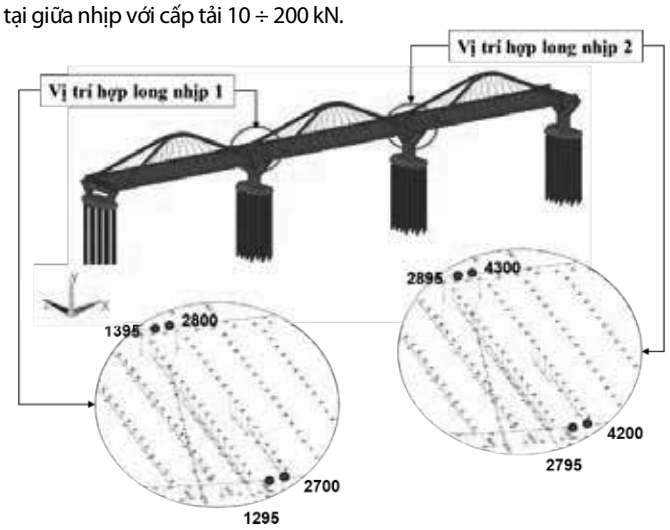
Bảng 2. Nhiệt độ bề mặt thép và TU của sáu trạng thái nhiệt (°C)

Nội dung	Ký hiệu	Kịch bản 1	Kịch bản 2	Kịch bản 3
Nhiệt độ cơ sở giả định	$T_{erection}$	23,90	23,90	23,90
Nhiệt độ bề mặt thép lớn nhất	T_{smax}	64,80	44,29	18,91
Nhiệt độ bề mặt thép nhỏ nhất	T_{smin}	57,51	36,37	13,25
Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất	TU_{max}	40,90	20,39	-4,99
Chênh lệch nhiệt độ nhỏ nhất	TU_{min}	33,61	12,47	-10,65

3.2. Mô hình phần tử hữu hạn

Mô hình PTHH được xây dựng bằng RM Bridge với phần tử dầm không gian cho dầm hộp, sườn vòm, trụ, cọc; phần tử cáp cho thanh treo; liên kết đàn hồi cho gối và đà giáo (độ cứng đứng của gối 4,03×10^6 kN/m tại P1, P4 và 1,16×10^7 kN/m tại P2, P3). Do đối xứng qua tim cầu, kết quả được trình bày cho một dầm chủ với bốn đầu dầm K1-T, K1-P,

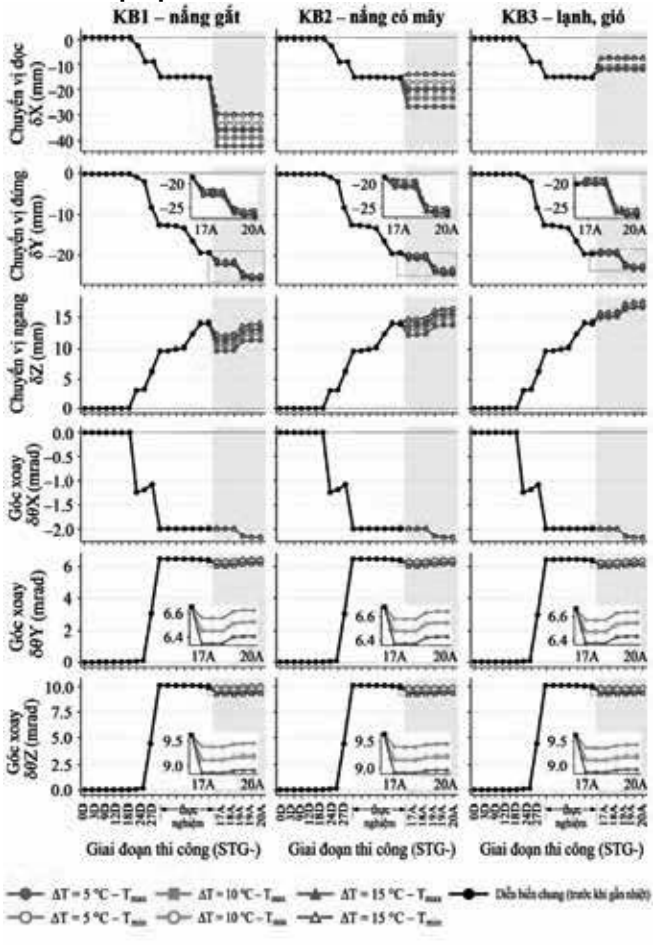
K2-T, K2-P (nút 1295, 2700, 2795, 4200) tại khe K1, K2 trên trụ P2, P3 (Hình 1). Thi công gồm 20 giai đoạn: lần lượt nhịp 3, 2, 1 lắp dầm và vòm, căng thanh treo, tháo đà giáo, lắp bản mặt cầu; sau đó hàn hợp long (STG-18), tháo gối tạm và hoàn thiện. Tại trạng thái chờ hợp long sau STG-17, bổ sung STG-17A xét *TU*, *ΔT* và STG-17B xét đối trọng hoặc kích tại giữa nhịp với cấp tải 10 ÷ 200 kN.



Hình 1. Mô hình PTHH và vị trí các đầu dầm khảo sát tại khe hợp long

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả phân tích



Hình 2. Diễn biến chuyển vị tại nút 2700 qua các giai đoạn thi công

Hình 2 thể hiện diễn biến chuyển vị tại hai đầu dầm điển hình qua các giai đoạn thi công. Tại STG-17, nút 2700 có chuyển vị đứng -19,6 mm, chuyển vị ngang 15,1 mm, góc xoắn -2,0 mrad, góc xoay quanh trục Y, Z lần lượt 6,6 và 9,5 mrad. Đối trọng tại giữa nhịp gây chuyển vị tuyến tính nhưng rất nhỏ (lực kích cho kết quả ngược dấu): tại P = 200 kN, chuyển vị dọc đầu dầm 0,18 ÷ 0,23 mm, chuyển vị đứng 0,12÷0,13 mm, góc xoay quanh trục Y, Z khoảng 0,035 và 0,050 mrad, góc xoắn 0,003 ÷ 0,005 mrad. Hai đầu dầm tại một khe dịch chuyển dọc ngược chiều nên khoảng hở thay đổi (1,8 ÷ 2,0)×10^{-3} mm/kN, còn chuyển vị đứng, ngang và góc xoắn của hai đầu gần như tương đương. Ở STG-17A, chuyển vị dọc thay đổi theo cả *TU* và *ΔT*, còn góc xoay hầu như phụ thuộc *ΔT*.

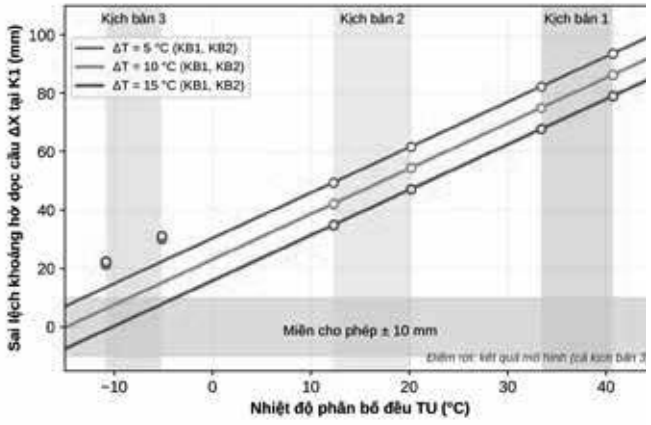
4.2. Sai lệch hình học tại khe hợp long

Đối chiếu với Bảng 1 cho thấy hai thành phần vượt giới hạn là sai lệch khoảng hở dọc cầu *ΔX* và độ vênh *Δv* giữa mép trên và mép dưới; cả hai được bù bằng hình học đoạn dầm chêm. Với kịch bản 1, 2, quan hệ giữa *ΔX* tại khe K1 với *TU* và *ΔT* là tuyến tính (R^2 = 1,00) theo (13) và Hình 3; ở kịch bản 3, dầm giữ *TU* nên *ΔX* theo (14). *ΔX* đạt 21 ÷ 22 mm ở trạng thái lạnh nhất và 79 ÷ 94 mm ở trạng thái nóng nhất, gấp gần 10 lần giới hạn. Vì khoảng hở chỉ thay đổi (1,8÷2,0)×10^{-3} mm/kN, cần khoảng 4÷5×10^4 kN để triệt tiêu *ΔX* nên đối trọng hoặc kích không thể thay thế đoạn chêm. *ΔY* = 6,9÷7,4 mm và *ΔZ* = 4,5÷4,9 mm nằm trong giới hạn (tối đa 74% và 81%), do tĩnh tải quyết định và được xử lý bằng trắc đạc, căn chỉnh khi lắp ráp.

$$\Delta X_1 = 37{,}6 + 1{,}556TU - 1{,}455\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (13)$$

$$\Delta X_{1'} = 37{,}6 + 1{,}553TU + 0{,}102\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (14)$$

Trong đó: 37,6 mm là phần do tĩnh tải và trình tự thi công; 1,556*TU* là phần do nhiệt độ phân bố đều; 1,455*ΔT* là phần giảm do dầm nhiệt thấp hơn vòm, gồm dầm co ngắn làm khe hẹp lại khoảng 1,56 mm/°C và vòm giãn dài đẩy hai đầu dầm ra ngoài khoảng 0,10 mm/°C.



Hình 3. Quan hệ giữa *TU*, *ΔT* và sai lệch khoảng hở dọc cầu tại khe K1

Lệch mép tuyệt đối tại bốn đầu dầm xấp xỉ -10 mm do góc xoắn tích lũy từ tĩnh tải ($\delta\theta_{X0} \approx$ 2,0 mrad), nhưng hai đầu dầm xoắn gần như đồng thời nên lệch mép tương đối chỉ khoảng 0,12 mm (4% giới hạn) khi hệ dầm ngang và bản mặt cầu đã hình thành. Khi *ΔT* tăng, vòm nóng hơn kéo dầm vồng lên làm $|\delta\theta_Z|$ giảm 0,0385 mrad/°C tại K1-T và 0,0389 mrad/°C tại K1-P; hai mặt khe xoay ngược chiều nên góc mở tương đối giảm 0,077 mrad/°C và độ vênh giảm khoảng 0,19 mm/°C, còn *ΔY*, *ΔZ* thay đổi dưới 0,6 mm.

4.3. Kích thước đoạn dầm chêm

Đoạn dầm chêm có mặt cắt dầm tại đỉnh trụ cao h_d = 5,0 m, chiều dài danh định L_0 = 2,0 m (Hình 4). Do khe hợp long vừa hở dọc trục vừa vênh giữa mép trên và mép dưới, đoạn chêm có dạng hình thang trên mặt đứng với các kích thước gia công: chiều dài tại tim

mặt cắt L_c, chiều dài mép trên $L_{trên}$, mép dưới $L_{dưới}$ và góc vát hai mặt đầu β_1, β_2, xác định theo (15)-(18).

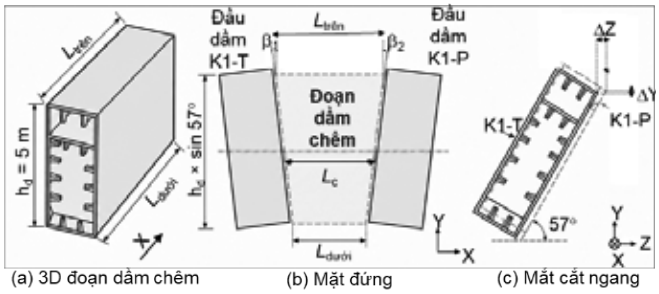
$$L_c = L_0 - \Delta X \quad (15)$$

$$\Delta v = \delta_X(K1 - T) - \delta_X(K1 - P) \quad (16)$$

$$L_{\text{trên}} = L_c + \Delta v/2\ ;\ \ L_{\text{dưới}} = L_c - \Delta v/2 \quad (17)$$

$$\beta_i = \arctan\left(\delta_{X,i}/h_d\right) \quad (18)$$

Trong đó: δ_X là độ vênh tại từng đầu dầm theo (12); i = 1, 2 ứng với mặt đầu phía trái và phải của khe. Hai nhịp kề khe đều võng nên mặt đầu dầm ngả mép trên về phía nhịp, khe rộng ở mép trên ($L_{trên}$ > $L_{dưới}$); chiều vênh cần được xác nhận bằng đo khe hở tại bốn góc trước khi cắt tinh.



(a) 3D đoạn dầm chêm (b) Mặt đứng (c) Mắt cắt ngang

Hình 4. Hình học đoạn dầm chêm tại khe hợp long

Với 18 trường hợp tính, L_c tại khe K1 thay đổi 1906,34÷1978,69 mm, ngắn đi khoảng 1,55 mm khi *TU* tăng 1 °C; khe K2 cần đoạn chêm dài hơn khe K1 khoảng 7 mm nên hai đoạn chêm phải gia công riêng. Ở kịch bản 1, 2, mỗi 5 °C dầm lạnh hơn vòm cần đoạn chêm dài thêm 7,3 mm: dùng kích thước tính cho ΔT = 5 °C khi thực tế ΔT = 15 °C sẽ thiếu 14,5 mm, vượt dung sai 10 mm; ở kịch bản 3, ảnh hưởng của ΔT chỉ 0,1 mm/°C. Ngược lại, độ vênh hầu như không phụ thuộc *TU* (Bảng 3): ở cùng một ΔT, Δv tại khe K1 chỉ dao động khoảng 0,2 mm. Với Δv = 40,3 ÷ 42,6 mm, mỗi mặt đầu đoạn chêm vát $\beta \approx 0{,}23 \div 0{,}25°$, trong dung sai +10°/-5°; đoạn chêm vuông góc sẽ làm chênh khe hở mép trên - mép dưới vượt xa 2 mm nên góc vát phải được tạo sẵn khi gia công.

Bảng 3. Độ vênh, góc vát và các sai lệch còn lại tại khe hợp long theo ΔT

Đại lượng	ΔT = 5 °C	ΔT = 10 °C	ΔT = 15 °C	Giới hạn
Độ vênh Δv tại khe K1 (mm)	42,36÷ 42,55	41,44÷ 41,60	40,52÷ 40,66	2
Độ vênh Δv tại khe K2 (mm)	42,11÷ 42,32	41,19÷ 41,37	40,27÷ 40,42	2
Góc vát β_1 / β_2 tại khe K1 (°)	0,24 / 0,25	0,236 / 0,24	0,23 / 0,23	+10° / -5°
ΔY lớn nhất (mm)	7,37	7,37	7,42	10
ΔZ lớn nhất (mm)	4,82	4,82	4,86	6
Lệch mép tương đối m lớn nhất (mm)	0,12	0,12	0,12	3,0

Với kịch bản 1 và 2, L_c biểu diễn bằng hồi quy tuyến tính theo (19), (20) với sai số dưới 0,06 mm; với kịch bản 3, L_c xác định theo (21), (22); độ vênh lấy gần đúng theo (23), (24). Toán đồ Hình 5 biểu diễn (19) cho ba mức ΔT, dải tô nhạt là lượng dư gia công ±25 mm. Do đoạn chêm chế tạo tại xưởng trước khi biết chắc nhiệt độ hợp long, giá trị tra được dùng để gia công thô; kích thước cuối cùng được cắt tinh theo khe hở thực đo.

$$L_{c1} = 1962{,}4 - 1{,}556TU + 1{,}455\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (19)$$

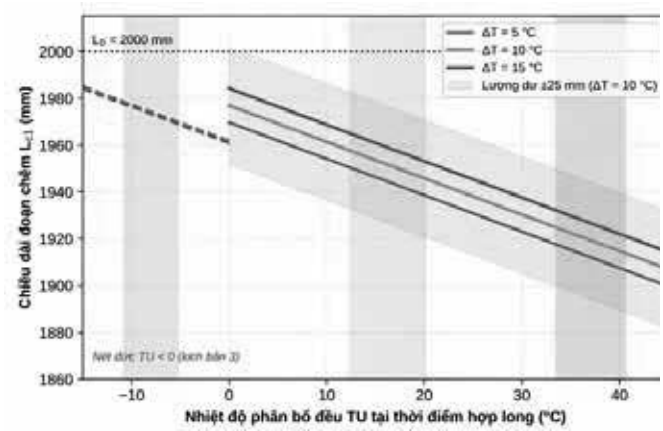
$$L_{c2} = 1969{,}5 - 1{,}551TU + 1{,}453\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (20)$$

$$L_{c1'} = 1962{,}4 - 1{,}553TU - 0{,}102\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (21)$$

$$L_{c2'} = 1969{,}4 - 1{,}548TU - 0{,}100\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (22)$$

$$\Delta v_1 = 43{,}4 - 0{,}19\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (23)$$

$$\Delta v_2 = 43{,}1 - 0{,}19\Delta T\ ;\ (\text{mm}) \quad (24)$$



Hình 5. Toán đồ xác định chiều dài đoạn dầm chêm L_c theo nhiệt độ hợp long và ΔT

4.4. Quy trình kiểm soát và hiệu chỉnh

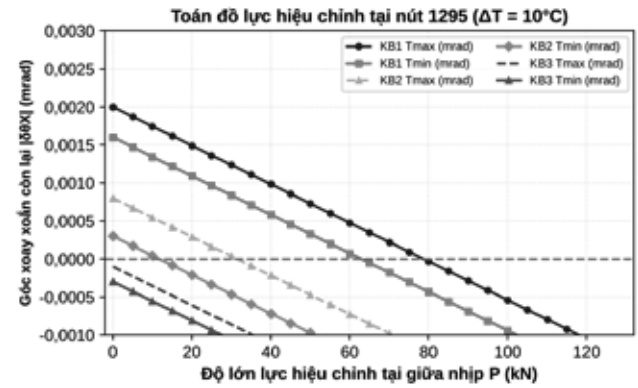
Công cụ tra lực gia tải hoặc kích theo góc xoắn mục tiêu a cho từng đầu dầm được xây dựng từ hệ số nhạy nhiệt k_T (25) và hệ số ảnh hưởng đơn vị c_P (26) của góc xoắn, xác định bằng hồi quy qua gốc tọa độ; lực hiệu chỉnh tính theo (27). Hồi quy c_P đạt R^2 > 0,99; với k_T, khi $\Delta T \neq 0$ quan hệ $\delta\theta_X$ - *TU* không còn đi qua gốc tọa độ (ở ΔT = 10°C, R^2 = 0,81 ÷ 0,97) nên cần cộng phần góc xoắn do ΔT xác định từ nhiệt độ đo riêng của vòm và dầm. Hình 6 là toán đồ (27) tại khe K1 với ΔT = 10°C; kịch bản 1, 2 dùng kích hướng lên, kịch bản 3 dùng đối trọng hướng xuống. Góc xoắn do nhiệt chỉ ở mức 10^{-3} mrad nên riêng nhiệt độ không đòi hỏi hiệu chỉnh xoắn; toán đồ là công cụ dự phòng khi quan trắc phát hiện góc xoắn lớn hơn dự tính do lắp lệch, gió ngang hoặc chênh nhiệt giữa hai sườn vòm.

$$k_T = \sum TU_i\delta\theta_{Xi} \Big/ \sum TU_i^2\ ;\ (\text{mrad/°C}) \quad (25)$$

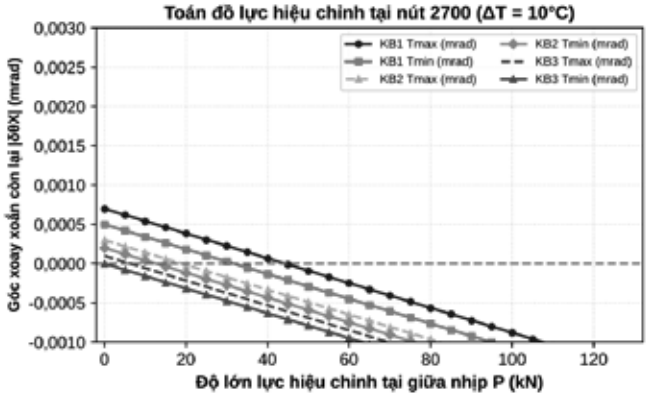
$$c_P = \sum P_i\delta\theta_{Xi} \Big/ \sum P_i^2\ ;\ (\text{mrad/kN}) \quad (26)$$

$$P = (k_T|TU| - a)/c_P \quad (27)$$

Trên cơ sở các kết quả trên, quy trình sáu bước xác định kích thước và lắp đặt đoạn dầm chêm được đề xuất trong Hình 7, trong đó TU được xác định theo nhiệt độ sườn vòm ở kịch bản 1, 2 và theo nhiệt độ dầm chủ ở kịch bản 3; đoạn chêm là biện pháp chính, lực kích hoặc đối trọng chỉ dùng để hiệu chỉnh tinh. Quan trọng nhất là bước phải quan trắc liên tục lớn hơn 24 giờ để có thể xác định được thời điểm ảnh hưởng là nhỏ nhất của các trường nhiệt bức xạ.



(a) Nút 1295 (K1-T)



(b) Nút 2700 (K1-P)

Hình 6. Toán đồ lực hiệu chỉnh góc xoắn tại hai đầu dầm khe K1 ($\Delta T = 10$ °C)



Hình 7. Quy trình sáu bước xác định kích thước và lắp đặt đoạn dầm chêm tại hiện trường

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu rút ra sáu kết luận chính:

(1) Khoảng hở dọc cầu vượt dung sai ở mọi trường hợp (21÷94 mm tại khe K1 so với 10 mm), tuyến tính theo *TU* và ΔT và không thể khử bằng đối trọng hay kích; đoạn dầm chêm có kích thước theo nhiệt độ hợp long là giải pháp bắt buộc.

(2) Nhiệt độ phân bố đều không gây vặn xoắn mặt cắt đầu dầm đáng kể: lệch mép tương đối chỉ khoảng 4% giới hạn; ΔY, ΔZ nằm trong giới hạn. Lực kích hoặc đối trọng chỉ dùng để hiệu chỉnh tinh khi quan trắc phát hiện sai lệch góc xoay do lắp dựng.

(3) Chiều dài đoạn chêm tại tim mặt cắt thay đổi 1906÷1979 mm (khe K1) và 1914 ÷ 1986 mm (khe K2), ngắn đi khoảng 1,55 mm cho mỗi °C tăng của *TU* và dài thêm 1,455 mm cho mỗi °C dầm nhiệt thấp hơn vòm ở kịch bản có bức xạ.

(4) Hai mặt đầu đoạn chêm phải vát khoảng 0,23 ÷ 0,25° để bù độ vênh 40 ÷ 43 mm giữa mép trên và mép dưới; độ vênh này chủ yếu do tĩnh tải và giảm khoảng 0,19 mm/°C theo ΔT.

(5) Công thức (19)-(24), toán đồ và quy trình sáu bước cho phép xác định ngay *Ltrên*, *Ldưới* và β từ nhiệt độ thực đo; nhiệt độ vòm và dầm phải được đo riêng vì bỏ qua ΔT có thể làm đoạn chêm thiếu $1{,}455\Delta T$ (≈ 22 mm khi $\Delta T = 15$ °C).

(6) Nghiên cứu mới giả thiết trường nhiệt đối xứng qua mặt phẳng dọc tim cầu và giá trị ΔT theo giả định. Hướng tiếp theo là khảo sát trường nhiệt phản đối xứng giữa hai sườn vòm, kiểm tra riêng giai đoạn lắp vòm khi chưa có hệ dầm ngang và kiểm chứng bằng số liệu quan trắc thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] L. Wang, J. Xu, Y. Li, S. Zhou. Closure technology of large span steel truss arch bridge with temporarily fixed edge supports. Nonlinear Engineering, vol. 14, no. 1, Art. 20240067, 2025, doi: 10.1515/nleng-2024-0067.

[2] N. Wang, Q. Wei, Z. Chang, B. Liu, Z. Fan, C. Han. Research on the cable force optimization of the precise closure of steel truss arch bridges based on stress-free state control. Mathematics, vol. 13, no. 14, Art. 2314, 2025, doi: 10.3390/math13142314.

[3] Z. Li, X. Dong, H. Chen, L. Chi, Z. Zhang. Overall lifting construction control method for large-segment steel arch bridges based on unstressed state control theory. Buildings, vol. 15, no. 4, Art. 523, 2025, doi: 10.3390/buildings15040523.

[4] F. Cui, X. Zhang, H. Li, A. Y. Elghazouli, Y. Liu. Temperature field effects and thermal-induced response of curved steel box-girder bridges using field monitoring data and numerical assessments. Journal of Constructional Steel Research, vol. 237, Art. 110102, 2026, doi: 10.1016/j.jcsr.2025.110102.

[5] L. Zhou, Y. Fan, S. Huang, Y. Shan, Y. Xia. Numerical calculation of bridge temperature considering all-weather conditions. Advances in Structural Engineering, vol. 28, no. 15, pp. 2925-2941, 2025, doi: 10.1177/13694332251365967.

[6] H. Yang, X. Zhao, L. Fu, X. Ruan, Y. Li, D. Chen. Study of periodical temperature change induced deformation of an inclined steel arch bridge exposed to actual environment based on synchronous multi-member thermal simulation. Sustainability, vol. 14, no. 16, Art. 10042, 2022, doi: 10.3390/su141610042.

[7] S. Song, J. Qian, L. Zhou. Temperature field and gradient effects for concrete-filled steel tubular truss arch bridges under construction. Buildings, vol. 16, no. 5, Art. 969, 2026, doi: 10.3390/buildings16050969.

[8] H. Sugihardjo, Tavio, D. Prasetya, N. Achmad. Defining appropriate temperature for perfect erection time of steel arch bridge closure to minimize the effect of the thermal stress. Case study: The new Kutai Kartenagara bridge, Indonesia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 267, Art. 012018, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/267/1/012018.

[9] G. Tu, D. Yan, K. Zhang. Calculation method and countermeasure for closure temperature influence in trussed CFST arch bridge. Engineering Mechanics, vol. 25, no. 4, pp. 236-240, 2008.

[10] H. Lu, J. Hao, J. Zhong, Y. Wang, H. Yang. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data. Advances in Civil Engineering, vol. 2020, Art. 9572602, 2020, doi: 10.1155/2020/9572602.

[11] Weather Spark. Climate and average weather year round in Hanoi, Vietnam. Internet: https://weatherspark.com/ (accessed: June 28, 2026).

[12] R. Sun, Y. Suzuki, T. Tomiyama, Y. Kitane, K.-C. Chang, K. Sugiura. Temperature variation on different colored steel plates caused by solar radiation. Journal of Structural Engineering A (JSCE), vol. 67A, pp. 452-463, 2021.

■ Ngày nộp bài: 09/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 16/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 03/11/2026

Nghiên cứu đặc tính cơ học và dao động tự do của cụm nhíp ô tô bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Study on the mechanical characteristics and free vibration of an automotive leaf spring assembly using the finite element method

> TS PHÍ HOÀNG TRÌNH*, THS LÊ TRẠCH TRƯỞNG
Trường Đại học Công nghệ Đông Á
*Email: trinh.phihoang@eaut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu đặc tính cơ học tĩnh và dao động tự do của cụm nhíp ô tô nhiều lá bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Mô hình số được xây dựng với lưới phần tử khối sử dụng phương pháp quét lưới, kích thước phần tử 5 mm, gồm 174.040 phần tử. Tương tác giữa các lá nhíp được mô phỏng bằng mô hình tiếp xúc có xét đến ma sát Coulomb với hệ số ma sát không đổi. Kết quả phân tích tĩnh dưới tải trọng thẳng đứng 8.000 N cho thấy chuyển vị tổng thể cực đại của cụm nhíp đạt 0,0069292 m, trong khi ứng suất tương đương von Mises lớn nhất đạt 424,38 MPa và tập trung tại khu vực tai nhíp. Hệ số an toàn tĩnh được xác định là 2,59 theo giới hạn bền được sử dụng trong mô hình. Bên cạnh đó, phân tích dao động riêng được thực hiện để xác định các tần số riêng và dạng dao động tương ứng. Kết quả cho thấy Mode 7 có tần số riêng 171,25 Hz, tương ứng với dạng dao động uốn của kết cấu. Các kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá đáp ứng cơ học và đặc tính dao động của cụm nhíp trong điều kiện mô phỏng đã thiết lập, đồng thời hỗ trợ các nghiên cứu tiếp theo về độ bền và cải tiến thiết kế hệ thống treo ô tô.

Từ khóa: Cụm nhíp ô tô; phương pháp phần tử hữu hạn; tiếp xúc ma sát Coulomb; ứng suất tương đương von Mises; tần số riêng; dạng dao động.

ABSTRACT

This paper investigates the static mechanical behavior and free vibration characteristics of a multi-leaf automotive spring assembly using the finite element method (FEM). The numerical model is constructed with solid elements utilizing the sweep meshing method, with an element size of 5 mm and totaling 174,040 elements. The interaction between the leaf springs is simulated via a contact model incorporating Coulomb friction with a constant friction coefficient. Static analysis results under a vertical load of 8,000 N demonstrate that the maximum total displacement of the assembly reaches 0.0069292 m, while the peak von Mises equivalent stress stands at 424.38 MPa, localized at the spring eye region. The static factor of safety is determined to be 2.59 based on the yield strength implemented in the model. Furthermore, modal analysis is performed to identify the natural frequencies and their corresponding mode shapes. The results reveal that Mode 7 exhibits a natural frequency of 171.25 Hz, corresponding to the structural bending mode. The research findings provide a quantitative foundation for evaluating the mechanical response and vibration characteristics of the leaf spring under the established simulation environment, while supporting subsequent studies on durability and design improvements of automotive suspension systems.

Keywords: Automotive leaf spring; finite element method; Coulomb frictional contact; von Mises equivalent stress; natural frequency; mode shape.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cụm nhíp nhiều lá là bộ phận quan trọng trong hệ thống treo ô tô, có chức năng chịu tải và góp phần hấp thụ dao động từ mặt đường. Đặc tính cơ học của cụm nhíp phụ thuộc vào hình học, vật liệu, điều kiện tải trọng và tương tác giữa các lá nhíp. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng rộng rãi để phân tích ứng suất, biến dạng và đánh giá độ bền của kết cấu nhíp ô tô [1-4]. Đối với cụm nhíp nhiều lá, việc mô hình hóa tiếp xúc và ma

sát giữa các lá có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định đáp ứng cơ học của kết cấu.

Bên cạnh phân tích tĩnh, các nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để khảo sát tần số riêng và dạng dao động của nhíp ô tô [5, 6]. Những nghiên cứu khác tập trung vào sử dụng vật liệu composite và tối ưu hóa kết cấu nhằm giảm khối lượng, đồng thời duy trì các yêu cầu về độ bền và độ cứng [7-10]. Tại Việt Nam, FEM và phần mềm ANSYS cũng đã được ứng dụng trong tính toán, kiểm nghiệm độ bền của cụm nhíp ô tô [11]. Tuy nhiên, việc khảo sát đồng thời đặc tính cơ học tĩnh và dao động riêng trên cùng một mô hình, có xét đến tương tác ma sát giữa các lá nhíp, vẫn cần được nghiên cứu trong những điều kiện tải trọng và ràng buộc cụ thể.

Trong nghiên cứu này, phương pháp FEM được sử dụng để phân tích đặc tính cơ học tĩnh và dao động riêng của cụm nhíp ô tô nhiều lá trên phần mềm ANSYS. Mô hình sử dụng lưới Sweep Mesh với kích thước phần tử 5 mm và thiết lập tiếp xúc ma sát Coulomb giữa các lá nhíp. Phân tích tĩnh được thực hiện dưới tải trọng thẳng đứng 8.000 N nhằm xác định chuyển vị tổng thể, ứng suất tương đương von Mises và hệ số an toàn tĩnh. Phân tích modal được thực hiện để xác định các tần số riêng và dạng dao động tương ứng. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ đáp ứng cơ học và đặc trưng dao động của cụm nhíp trong phạm vi điều kiện mô phỏng đã thiết lập.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc hình học và đặc tính vật liệu

Cụm nhíp nhiều lá được mô hình hóa trong không gian ba chiều, bao gồm các lá nhíp chính, lá nhíp phụ, quai U-bolt và hai tai nhíp ở hai đầu. Mô hình được xây dựng trên phần mềm ANSYS để phân tích đặc tính cơ học tĩnh và dao động riêng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Vật liệu được giả thiết là thép lò xo hợp kim, có tính đàn hồi tuyến tính và đẳng hướng. Các thông số vật liệu được lấy từ thư viện ANSYS và trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số cơ học của vật liệu sử dụng trong mô hình

STT	Thông số vật liệu	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng riêng	ρ	7.850	kg/m³
2	Mô-đun đàn hồi Young	E	200	GPa
3	Hệ số Poisson	ν	0,3	–
4	Giới hạn chảy danh nghĩa	σ_y	1.100	MPa

Trong phạm vi mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính đẳng hướng, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được biểu diễn bằng:

$$\sigma = \mathrm{D}\varepsilon \quad (1)$$

Trong đó: σ là vector ứng suất, ε là vector biến dạng và D là ma trận đặc trưng vật liệu, phụ thuộc vào mô-đun đàn hồi Young E và hệ số Poisson ν.

Mô-đun trượt của vật liệu được xác định theo công thức:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

Mô-đun trượt của vật liệu là G=76,92GPa. Các thông số vật liệu trong Bảng 1 được sử dụng để xây dựng mô hình số và thực hiện các phân tích cơ học tĩnh, dao động riêng của cụm nhíp. Giới hạn chảy danh nghĩa được sử dụng làm cơ sở tham chiếu khi đánh giá trạng thái ứng suất của kết cấu trong điều kiện tải trọng khảo sát.

2.2. Rời rạc hóa mô hình và chia lưới

Mô hình hình học cụm nhíp được rời rạc hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong ANSYS. Phương pháp quét lưới được sử dụng để tạo lưới phần tử khối cho các chi tiết phù hợp. Kích thước phần tử được thiết lập là 5 mm. Các thông số chia lưới chính được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số chia lưới của mô hình phần tử hữu hạn

STT	Thông số	Giá trị
1	Physics Preference	Mechanical
2	Element Order	Program Controlled
3	Phương pháp chia lưới	Sweep Mesh
4	Kích thước phần tử	5 mm
5	Tổng số nút	324,683
6	Tổng số phần tử	174,04

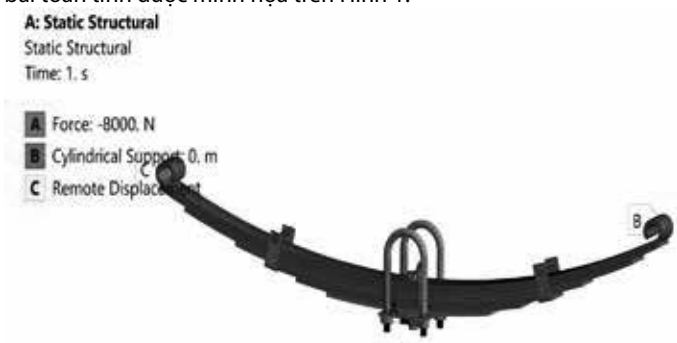
Sau khi rời rạc hóa kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn, phương trình cân bằng của hệ trong bài toán tĩnh học được biểu diễn như sau:

$$\mathrm{Ku} = \mathrm{F} \quad (3)$$

Trong đó: K là ma trận độ cứng tổng thể của kết cấu; u là vector chuyển vị nút và F là vector tải trọng nút tương đương. Mô hình sử dụng kích thước phần tử danh nghĩa 5 mm; độ chính xác của kết quả phụ thuộc vào chất lượng lưới, mô hình vật liệu, điều kiện biên và thiết lập tiếp xúc.

2.3. Điều kiện biên và tương tác tiếp xúc ma sát

Mô hình được thiết lập để thực hiện hai bài toán: Phân tích cơ học tĩnh và phân tích dao động riêng Điều kiện biên và tải trọng của bài toán tĩnh được minh họa trên Hình 1.



Hình 1. Điều kiện biên và tải trọng tác dụng lên cụm nhíp trong ANSYS

2.3.1. Mô hình tiếp xúc ma sát giữa các lá nhíp

Tiếp xúc giữa các bề mặt của những lá nhíp liền kề được mô phỏng bằng mô hình Frictional Contact, sử dụng định luật ma sát Coulomb với hệ số ma sát không đổi μ .Quan hệ giữa lực ma sát tiếp tuyến và lực pháp tuyến được biểu diễn:

$$|\mathrm{F}_t| \leq \mu F_n \quad (4)$$

Trong đó: $\mathrm{F_t}$ là lực ma sát tiếp tuyến; $\mathrm{F_n}$ là độ lớn lực pháp tuyến tại vùng tiếp xúc và μ là hệ số ma sát. Khi bề mặt tiếp xúc ở trạng thái trượt, lực ma sát đạt giới hạn:

$$|\mathrm{F}_t| = \mu F_n \quad (5)$$

Mô hình này cho phép xem xét sự truyền lực và trượt tương đối giữa các lá nhíp, qua đó đánh giá ảnh hưởng của tương tác tiếp xúc đến chuyển vị và phân bố ứng suất của kết cấu.

2.3.2. Thiết lập mô hình tĩnh

Bài toán tĩnh được thiết lập với tải trọng và điều kiện biên mô phỏng liên kết của cụm nhíp trong hệ thống treo ô tô, như minh họa trong Hình 1. Tại vị trí A, lực thẳng đứng 8.000 N được đặt theo chiều tác dụng đã xác định trong mô hình. Tại hai tai nhíp B và C, điều kiện *Cylindrical Support* được sử dụng để mô phỏng liên kết. Do mô hình có xét đến tiếp xúc ma sát giữa các lá nhíp, phương trình cân bằng được biểu diễn tổng quát như sau:

$$\mathrm{R(u)} = \mathrm{F_{ext}} \quad (6)$$

$R_{(u)}$ là vector lực nút trong phụ thuộc vào chuyển vị và F_{ext} là vector tải trọng ngoài. Nghiệm được xác định bằng bộ giải ANSYS theo các điều kiện biên và mô hình tiếp xúc đã thiết lập. Ứng suất tương đương von Mises được sử dụng để đánh giá trạng thái ứng suất của cụm nhíp, xác định theo ba ứng suất chính:

$$\sigma_{\mathrm{vM}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \quad (7)$$

Trong đó: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ là ba ứng suất chính tại điểm đang xét. Giới hạn chảy cua vật liệu $\sigma_y = 1.100$ MPa được sử dụng để đánh giá độ bền, hệ số an toàn theo tiêu chí von Mises được xác định bằng:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\mathrm{vM,max}}} \quad (8)$$

Trong đó: $\sigma_{\mathrm{vM,max}}$ là ứng suất tương đương von Mises lớn nhất trong mô hình.

2.3.3. Thiết lập bài toán phân tích dao động riêng

Phân tích dao động riêng được thực hiện nhằm xác định tần số tự nhiên và dạng dao động của cụm nhíp. Với giả thiết dao động tuyến tính không cản, phương trình chuyển động của hệ được viết như sau:

$$\mathrm{M\ddot{u} + Ku = 0} \quad (9)$$

Trong đó: M là ma trận khối lượng, K là ma trận độ cứng và ü là vector gia tốc nút. Chuyển vị dao động có dạng điều hòa:

$$\mathrm{u(t) = \phi \sin(\omega t)} \quad (10)$$

Thay phương trình (10) vào phương trình (9), thu được bài toán trị riêng:

$$(\mathrm{K} - \omega^2\mathrm{M})\phi = 0 \quad (11)$$

Trong đó: ω là tần số góc riêng và ϕ là vector dạng dao động tương ứng. Tần số riêng được xác định theo:

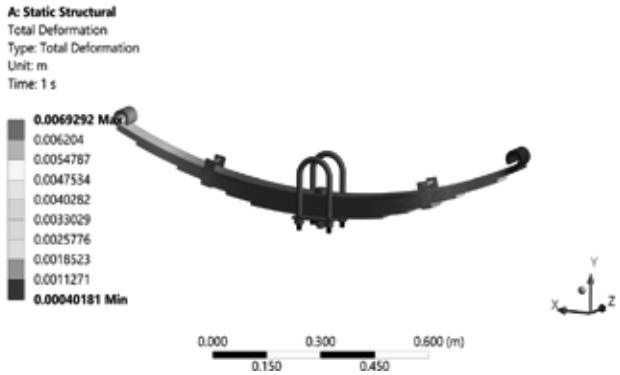
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (12)$$

Trong nghiên cứu này, 8 dạng dao động đầu tiên được trích xuất từ ANSYS để khảo sát đặc tính dao động của cụm nhíp. Các tần số riêng và dạng dao động tương ứng được phân tích dựa trên kết quả tính toán, có xét đến điều kiện liên kết của mô hình.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

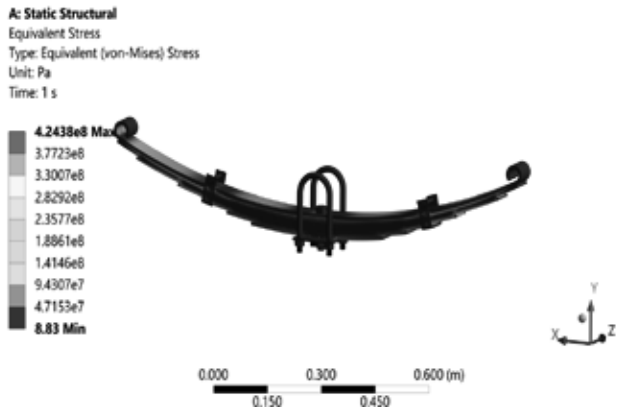
3.1. Kết quả phân tích đặc tính cơ học tĩnh (*Static Structural*)

Dưới tác dụng của tải trọng thẳng đứng 8.000 N, đặc tính cơ học tĩnh của cụm nhíp được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong ANSYS. Kết quả tính toán được đánh giá thông qua trường chuyển vị tổng thể và phân bố ứng suất tương đương von Mises.



Hình 2. Trường phân bố chuyển vị tổng thể của cụm nhíp

Hình 2 cho thấy chuyển vị tổng thể cực đại đạt 0,0069292 m, tại khu vực tai nhíp phía bên trái. Giá trị chuyển vị cực đại là thông số quan trọng để đánh giá độ cứng của cụm nhíp; việc xác định mức độ đáp ứng yêu cầu thiết kế cần dựa trên tiêu chí chuyển vị cho phép tương ứng với hệ thống treo được khảo sát.



Hình 3. Trường phân bố ứng suất tương đương von Mises của cụm nhíp

Ứng suất tương đương von Mises đạt cực đại 424,38 MPa tại vùng bán kính cong của tai nhíp, trong khi phần lớn thân các lá nhíp có ứng suất từ 47,15 đến 188,61 MPa. Với giới hạn chảy danh nghĩa 1.100 MPa, hệ số an toàn tĩnh đạt khoảng 2,59. Kết quả cho thấy kết cấu đáp ứng tiêu chí bền tĩnh trong điều kiện mô phỏng, tuy nhiên chưa đủ cơ sở để đánh giá tuổi thọ mỏi và độ an toàn trong toàn bộ điều kiện vận hành thực tế.

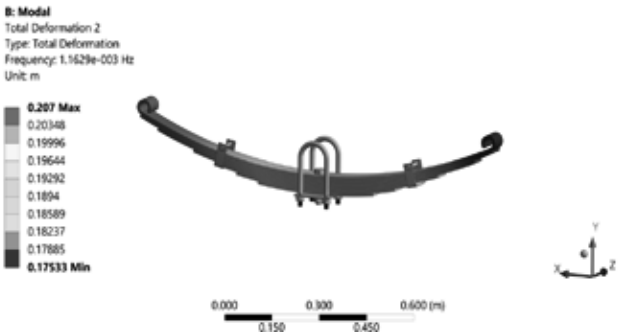
3.2. Phân tích dao động riêng của cụm nhíp ô tô

Dựa trên mô hình phần tử hữu hạn tại Mục 2.3.3, phân tích dao động riêng được thực hiện bằng ANSYS để xác định tần số riêng và dạng dao động của cụm nhíp ô tô. Tám mode đầu tiên được trích xuất, với tần số riêng trình bày trong Bảng 3 và các dạng dao động đại diện minh họa trong Hình 4 - 6.

Bảng 3. Kết quả phân tích tần số riêng của cụm nhíp ô tô

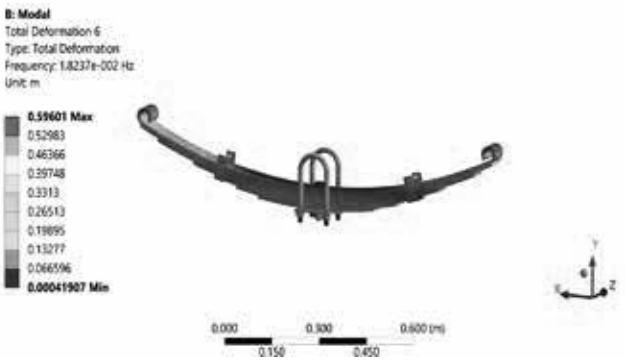
Thứ tự mode	Tần số riêng f (Hz)	Giá trị biến dạng (m)
Mode 1	0,0001	0,22541
Mode 2	$1{,}1629\times10^{-3}$	0,20700
Mode 3	$1{,}8259\times10^{-3}$	0,21192
Mode 4	$5{,}0115\times10^{-3}$	0,42169
Mode 5	$5{,}7031\times10^{-3}$	0,41557
Mode 6	$1{,}8237\times10^{-2}$	0,59601
Mode 7	171,25	0,65036
Mode 8	233,12	1,66840

Kết quả tại Bảng 3 cho thấy sáu mode đầu có tần số rất thấp, từ 0,0001 đến $1{,}8237\times10^{-2}$Hz, trong khi Mode 7 và Mode 8 đạt lần lượt 171,25 Hz và 233,12 Hz. Các mode có tần số gần bằng không có thể liên quan đến chuyển động vật rắn hoặc điều kiện ràng buộc chưa đầy đủ, do đó cần kiểm tra dạng dao động và điều kiện biên trước khi diễn giải ý nghĩa cơ học. Các dạng dao động của Mode 2, Mode 6 và Mode 7 được minh họa lần lượt trong Hình 4, Hình 5 và Hình 6.



Hình 4. Dạng dao động riêng thứ 2 của cụm nhíp ô tô

Mode 2 có tần số riêng 1,1629x10^{-3}Hz. Tần số rất thấp này có thể liên quan đến chuyển động vật rắn hoặc điều kiện ràng buộc chưa đầy đủ. Do đó, cần xem xét dạng dao động và chuyển động tương đối giữa các bộ phận để xác định bản chất của mode.



Hình 5. Dạng dao động riêng thứ 6 của cụm nhíp ô tô

Mode 6 có tần số riêng 5,7031x10^{-3}Hz, cao hơn Mode 2 nhưng vẫn thuộc vùng tần số rất thấp. Việc so sánh hai dạng dao động này cho phép xem xét sự khác biệt về chuyển động của cụm nhíp ở các mode tương ứng.



Hình 6. Dạng dao động riêng thứ 7 của cụm nhíp ô tô

Mode 7 có tần số riêng 171,25 Hz, cao hơn đáng kể so với 6 mode đầu. Dạng dao động tương ứng phản ánh đặc trưng biến dạng của cụm nhíp tại tần số này, cần được phân tích dựa trên phân bố chuyển vị tương đối giữa các lá nhíp và bộ phận liên kết.

Các dạng dao động trong ANSYS thường được chuẩn hóa về biên độ, do đó chuyển vị hiển thị chỉ thể hiện hình dạng tương đối của mode, không phải biên độ dao động thực tế. Khả năng cộng hưởng cần được đánh giá bằng cách đối chiếu tần số riêng với phổ kích thích của hệ thống treo.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên ANSYS để phân tích đặc tính cơ học tĩnh và dao động riêng của cụm nhíp ô tô trong điều kiện mô phỏng đã thiết lập. Các kết quả chính như sau:

Đặc tính cơ học tĩnh: Với tải trọng thẳng đứng 8.000 N, chuyển vị tổng thể cực đại đạt 6,9292 mm, trong khi ứng suất tương đương von Mises cực đại đạt 424,38 MPa tại vùng bán kính cong của tai nhíp bên trái. Với giới hạn chảy danh nghĩa 1.100 MPa, hệ số an toàn tĩnh tính toán đạt khoảng 2,59.

Đặc tính dao động riêng: Tám mode đầu tiên được trích xuất. Mode 7 có tần số riêng 171,25 Hz và Mode 8 đạt 233,12 Hz. Các mode có tần số gần bằng không cần được kiểm tra thêm về điều kiện biên và dạng dao động trước khi diễn giải ý nghĩa cơ học.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở số để đánh giá đáp ứng cơ học tĩnh và đặc tính dao động riêng của cụm nhíp. Các nghiên cứu tiếp theo cần kiểm tra độ hội tụ của lưới, đánh giá ảnh hưởng của điều kiện biên và mô hình tiếp xúc, đồng thời khảo sát đáp ứng động dưới tải trọng biến thiên để làm rõ hơn đặc tính làm việc của kết cấu trong điều kiện vận hành thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Society of Automotive Engineers. Manual on Design and Application of Leaf Springs. SAE HS J788, 4th ed. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1982.

[2] M. M. Shokrieh and D. Rezaei. Analysis and optimization of a composite leaf spring. Composite Structures, vol. 60, no. 3, pp. 317-325, 2003, https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00349-5.

[3] J. P. Hou, J.-Y. Cherruault, G. Jeronimidis, R. Mayer and R. J. Davies. Design, testing and simulation of fibre composite leaf springs for heavy axle loads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, vol. 219, no. 1, pp. 21-30, 2005, https://doi.org/10.1243/030932405X30704.

[4] M. M. Patunkar and D. R. Dolas. Modelling and analysis of composite leaf spring under the static load condition by using FEA. International Journal of Mechanical & Industrial Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 1-4, 2011.

[5] C. L. Fan, S. M. Li and Y. Y. Zhang. Nonlinear finite element analysis for stiffness characteristic, contact and friction of a leaf spring. Noise and Vibration Control, vol. 32, no. 3, pp. 16-20, 2012, https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1355.2012.03.004.

[6] Y. S. Kong, M. Z. Omar, L. B. Chua and S. Abdullah. Stress behavior of a novel parabolic spring for light duty vehicle. International Review of Mechanical Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 617-620, 2012.

[7] Y. S. Kong, M. Z. Omar, L. B. Chua and S. Abdullah. Explicit nonlinear finite element geometric analysis of parabolic leaf springs under various loads. The Scientific World Journal, vol. 2013, Article ID 261926, 2013, https://doi.org/10.1155/2013/261926.

[8] A. Balakrishna and P. K. Mishra. Modelling and analysis of static and modal responses of leaf spring used in automobiles. International Journal of Hydromechatronics, vol. 4, no. 4, pp. 350-367, 2021, https://doi.org/10.1504/IJHM.2021.120616.

[9] L. Ma, J. He, Y. Gu, Z. Zhang, Z. Yu, A. Zhou, L.-H. Tam and C. Wu. Structure design of GFRP composite leaf spring: An experimental and finite element analysis. Polymers, vol. 13, no. 8, Article 1193, 2021, https://doi.org/10.3390/polym13081193.

[10] J. Ke, Z. Wu, X. Chen and Z. Ying. A review on material selection, design method and performance investigation of composite leaf springs. Composite Structures, vol. 226, Article 111277, 2019, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111277.

[11] Y. Shi et al. Efficient method for calculating the composite stiffness of parabolic leaf springs with variable stiffness for vehicle rear suspension. Mathematical Problems in Engineering, 2016, Article ID 5169018, https://doi.org/10.1155/2016/5169018.

■Ngày nhận bài: 20/7/2026 ■Ngày sửa bài: 28/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng 12/8/2026

Tính toán khả năng chống chọc thủng của đài cọc bê tông cốt thép bằng mô hình thanh chống-giằng và mô hình mô phỏng số

Punching shear capacity of reinforced concrete pile caps using the strut-and-tie model and numerical simulation

> KS TRẦN NGỌC BÁCH[1,*], THS PHẠM TRUNG HIẾU[2], TS TRẦN VIỆT TÂM[1]
[1]Khoa Xây dựng DD&CN, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[2]Văn phòng Đảng ủy phường Hải An, TP Hải Phòng
[*]Email: tngocbach2210@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu tính toán khả năng chống chọc thủng của đài cọc bê tông cốt thép (BTCT) có bố trí 4 cọc trên cơ sở mô hình thanh chống-giằng (STM) và mô phỏng số bằng phần mềm Ansys. Mô hình thanh chống-giằng được thiết lập trên mặt cắt chéo đi qua tâm cột và tâm hai cọc đối diện, kiểm tra theo ba cơ chế: chảy dẻo thanh giằng thép, nén vỡ vùng nút dưới và nén vỡ vùng nút trên của nút bê tông. Mô hình số viết bằng ngôn ngữ APDL, được kiểm chứng thông qua các kết quả thực nghiệm của các nghiên cứu khác cho tỉ số P_{ANSYS}/P_{exp} trung bình là 0,95. Tiến hành khảo sát số các tham số ảnh hưởng đến khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT như tỉ số c_0/h, cường chịu nén của bê tông, ảnh hưởng của kích thước (size effect). Từ các kết quả khảo sát, bài báo có các kết luận và khuyến cáo trong tính toán thiết kế khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT.

Từ khóa: Đài cọc; Bê tông cốt thép; khả năng chống chọc thủng; mô hình thanh chống giằng (STM); mô phỏng số; SOLID65; tỉ số nhịp cắt, Ansys.

ABSTRACT

This paper presents a study on the punching shear capacity of reinforced concrete (RC) pile caps with four piles based on the strut-and-tie model (STM) and numerical simulation using ANSYS. The strut-and-tie model is established on a diagonal cross-section passing through the centers of the column and two opposite piles, and is verified against three failure mechanisms: yielding of the steel tie, crushing of the lower nodal zone, and crushing of the upper concrete nodal zone. The numerical model, developed using the APDL language, is validated against the experimental results of other studies, yielding an average ratio of P_{ANSYS}/P_{exp} of 0.95. A parametric numerical study is then conducted to investigate the effects of key parameters on the punching shear capacity of RC pile caps, including the c_0/h ratio, concrete compressive strength, and size effect. Based on the numerical results, conclusions and recommendations are proposed for the design and calculation of the punching shear capacity of RC pile caps.

Keywords: Pile cap; Reinforced concrete; punching shear capacity; strut-and-tie model (STM); numerical simulation; SOLID65; shear span ratio, Ansys.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đài cọc BTCT là cấu kiện quan trọng có nhiệm vụ truyền tải trọng từ chân cột xuống các cọc, qua đó truyền tải trọng của công trình xuống nền đất. Do có chiều cao lớn và khoảng cách truyền lực tương đối ngắn (nhịp chịu cắt), nên mặt phá hoại do cắt chọc thủng có thể hình thành với góc nghiêng lớn hơn 45° so với mặt phẳng đáy đài, trong khi một số phương pháp và tiêu chuẩn thiết kế thực hành như TCVN 5574:2018 [1], ACI 318:2025 [2], EC2:2023 [3] giả thiết góc nghiêng cố định là 45°, còn theo EC2:2004 [4] góc nghiêng là 26,6°, nên nhiều trường hợp áp dụng không áp dụng được do tháp chọc thủng nằm ngoài phạm vi đài cọc.

Thực tế đài cọc thường làm việc như một cấu kiện vùng gián đoạn D (Discontinuity Region), đây là vùng mà giả thiết tiết diện phẳng không còn đúng nữa, khác với các dầm thông thường làm việc ở vùng B (Bernoulli Region) là vùng giả thiết tiết diện phẳng còn đúng, biến dạng biến thiên tuyến tính theo chiều cao tiết diện. Theo nguyên lý Saint-Venant, vùng D lan rộng một đoạn xấp xỉ bằng chiều cao tiết diện kể từ vị trí gián đoạn. Với đài bốn cọc, khoảng cách từ mép cột đến tâm cọc thường nhỏ hơn chiều cao đài nên gần như toàn bộ đài nằm trong vùng D, do đó mô hình thanh chống-giằng phù hợp hơn lý thuyết dầm.

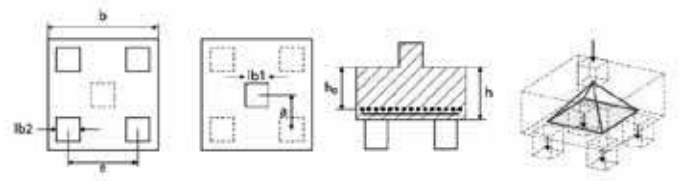
Mô hình thanh chống-giằng (Strut-and-Tie Model - STM) cho thấy sự phù hợp trong phân tích và thiết kế đài cọc do có khả năng mô phỏng trực tiếp cơ chế truyền lực thông qua các thanh chống bê tông (strut), thanh giằng chịu kéo (tie) và các nút truyền lực (node). Mô hình cho phép xác định lực trong thanh chống và thanh giằng, từ đó thiết kế cốt thép chịu kéo và kiểm tra khả năng chịu lực của các vùng nút và thanh chống bê tông.

Bài báo trình bày nghiên cứu tính toán khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT có bố trí 4 cọc trên cơ sở mô hình thanh chống–giằng và mô hình mô phỏng số bằng phần mềm Ansys. Mô hình số được kiểm chứng thông qua kết quả thực nghiệm của Clarke [5] và Suzuki [6] từ đó khảo sát số các tham số ảnh hưởng đến khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT.

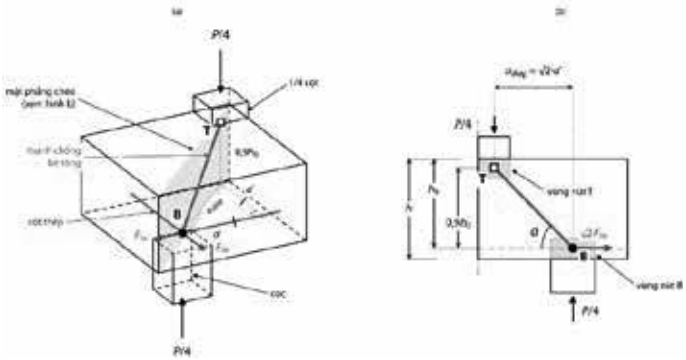
2. MÔ HÌNH THANH CHỐNG-GIẰNG CHO ĐÀI 4 CỌC

2.1. Sơ đồ tính

Xét đài bốn cọc có kích thước và bố trí như Hình 1. Theo mô hình thanh chống giằng, đài cọc được mô hình hóa thành mô hình dàn ảo không gian gồm bốn thanh chống bê tông (strut) nghiêng đi từ chân cột xuống bốn đầu cọc và lưới các thanh giằng (tie) là cốt thép dọc lớp dưới Hình 2. Hệ có hai mặt phẳng đối xứng nên lực nén P được chia đều cho bốn cọc; gọi V là phản lực thẳng đứng tại một cọc thì P=4V. Bài toán không gian được quy về sơ đồ phẳng bằng cách cắt một mặt phẳng chéo đi qua tâm cột và tâm hai cọc đối diện, sau đó tính một phần tư mô hình Hình 2. Mặt phẳng cắt này nghiêng 45° so với hai phương cốt thép trên mặt bằng để đi dọc theo thanh chống; 45° ở đây là góc của vết cắt trên mặt bằng, không phải góc nghiêng của mặt phá hoại.



Hình 1. Mặt bằng và sơ đồ không gian đài cọc BTCT 4 cọc



Hình 2. Sơ đồ tính mô hình thanh chống-giằng, *(a) sơ đồ không gian một phần tư đài cọc; (b) mặt cắt chéo qua tim cột và tim cọc*

Trên sơ đồ mặt cắt Hình 2, các giá trị như chiều dài hình chiếu ngang của thanh chống nghiêng a_{diag}, cánh tay đòn nội lực a′ và góc nghiêng α của thanh chống, hệ số suy giảm cường độ bê tông do nứt được xác định theo công thức:

$$a_{diag} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)e - \left(\frac{\sqrt{2}}{4}\right)l_{b1}\ ; \qquad (1)$$

$$a' = \frac{a_{diag}}{\sqrt{2}}\ ;\ \alpha = arctan\left(\frac{0,9h_0}{a_{diag}}\right)$$

$$v' = 1 - \frac{fc'}{250} \qquad (2)$$

Trong đó:

- e là khoảng cách giữa tâm hai cọc kề nhau;
- l_{b1} và l_{b2} là cạnh tiết diện cột và cọc;
- h và h_0 là chiều cao toàn phần và chiều cao làm việc của đài. Cánh tay đòn ngẫu lực có thể lấy bằng $0,9h_0$.
- a_{diag} là chiều dài hình chiếu bằng của thanh chống nghiêng trên mặt cắt chéo, đo từ trọng tâm một phần tư tiết diện cột đến tâm cọc; $a' = a_{diag}/\sqrt{2}$ là hình chiếu của a_{diag} lên phương cốt thép;
- α là góc nghiêng của thanh chống so với mặt phẳng đáy đài, $\alpha = arctan\left(\frac{0,9h_0}{a_{diag}}\right)$;
- $v' = 1 - f'c/250$ là hệ số suy giảm cường độ bê tông do nứt, lấy theo EC2:2004 [4];
- f'_c và f_y là cường độ chịu nén mẫu trụ của bê tông và giới hạn chảy của cốt thép.

2.2. Ba cơ chế phá hoại khống chế

a) Chảy dẻo thanh giằng cốt thép

Lực kéo trong thanh giằng được suy từ điều kiện cân bằng của nút dưới B, giao của trục cọc với trọng tâm lớp cốt thép chịu kéo (Hình 2). Thành phần nằm ngang của thanh chống nghiêng cân bằng với hợp lực kéo theo phương chéo, $\sqrt{2}\cdot Ftie = V/tan\alpha = V\cdot a_{diag}/(0,9h_0)$; hợp lực này phân đều cho hai phương cốt thép vuông góc. Từ đó lực kéo lớn nhất của dải thép đi qua một cọc và sức kháng thẳng đứng tương ứng là:

$$F_{tie} = \frac{\left(A_s \cdot f_y\right)}{2};\ V_{tie} = \frac{F_{tie}\cdot 0,9h_0}{a'} \qquad (3)$$

với A_s lần lượt là diện tích, và f_y là giới hạn chảy tương ứng.

Các giới hạn ứng suất vùng nút và các quan hệ vật liệu sử dụng theo EC2:2004 [4]; tên vùng nút đặt theo các thanh quy tụ tại nút, C (compression) là thanh chống chịu nén, T (tension) là thanh giằng chịu kéo: nút CCC chỉ có thanh chống quy tụ, nút CCT có thanh giằng neo theo một phương, nút CTT có thanh giằng neo theo hai phương.

b) Nén vỡ vùng nút dưới (phá hoại cắt)

$$d_b = \sqrt{2}\cdot l_{b2}\ ;\ A_b = \frac{d_b\cdot D_b}{2}\ ;$$

$$\beta_b = arctan\left[\frac{2\left(h - h_0\right)}{d_b}\right] \qquad (4)$$

$$\sigma_{nb,max} = 0,75\cdot v'\cdot f'c\ ;$$

$$V_{strut,b} = A_b \cdot \sigma_{nb,max} \cdot sin\alpha \cdot cos\left(90° - \alpha - \beta_b\right)$$

Trong đó:

- $\sigma_{nb,max} = 0,75v'f'c$ là ứng suất nén giới hạn của vùng nút dưới; nút này có hai thanh giằng đi qua (nút loại CTT) nên hệ số lấy bằng 0,75 theo EC2:2004 [4].
- d_b là chiều dài cơ sở của nút, lấy bằng đường chéo tiết diện cọc;
- D_b là cạnh nghiêng và β_b là góc nghiêng của vùng nút, xác định theo Hình 3; A_b là diện tích mặt nghiêng của vùng nút.
- $V_{strut,b}$ là giá trị lực nén lớn nhất mà vùng nút dưới chịu được.

c) Nén vỡ vùng nút trên

Hiệu ứng nén ba trục có kiềm chế của bê tông bao quanh chân cột làm cường độ chịu nén cục bộ tăng đáng kể so với cường độ mẫu trụ. Vùng nút trên nằm ngay dưới chân cột chỉ có các thanh chống đi qua (nút loại CCC); ứng suất nén giới hạn của vùng nút này được xác định như sau:

$$d_t = \frac{\sqrt{2}\cdot l_{b1}}{2};\ A_t = \frac{d_t \cdot D_t}{2};\ \beta_t = arctan\left(\frac{0,2h_0}{d_t}\right) \quad (5)$$

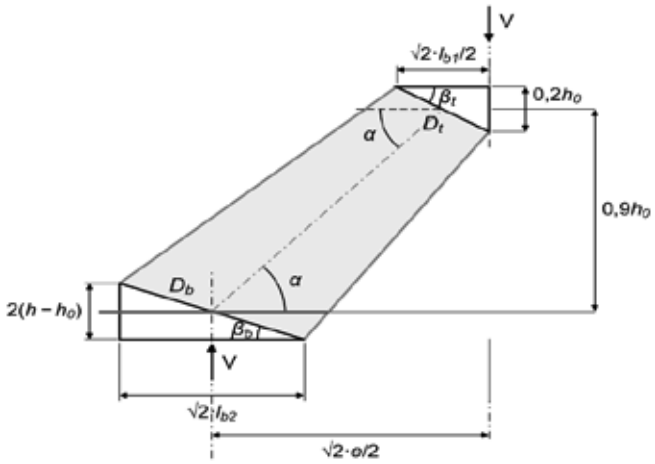
$$\sigma_c^1 = 1,25\nu' \cdot f'c \text{ hoặc } \sigma_c^2 = 3\nu' \cdot f'c \quad (6)$$

$$V_{strut,t} = A_t \cdot \sigma_c \cdot sin\alpha \cdot cos\left(90° - \alpha - \beta_t\right) \quad (7)$$

Trong đó:

- D_b và D_t là cạnh nghiêng của vùng nút dưới và vùng nút trên, xác định từ chiều dài cơ sở nút và chiều cao vùng nút tương ứng Hình 3.

- $\sigma_c^1 = 1,25\nu'f'c$ và $\sigma_c^2 = 3\nu'f'c$ là cận dưới và cận trên của ứng suất nén vùng nút có kiềm chế, lấy theo điều 3.1.9 và 6.5.4 (6) của EC2-2004 [4]. Vùng nút trên nằm dưới chân cột được bê tông xung quanh kiềm chế theo cả ba phương nên bài lấy $\sigma_c = \sigma_c^2$.



Hình 3. Kích thước hình học vùng nút dưới và vùng nút trên

2.3. Khả năng chịu lực của đài theo mô hình thanh chống-giằng

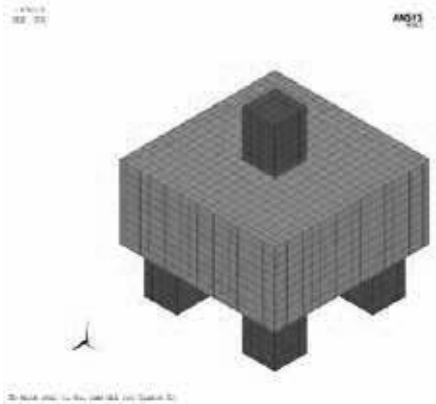
Khả năng chịu lực của toàn đài bằng giá trị nhỏ nhất của V phá hoại theo 3 cơ chế phá hoại nêu ở trên:

$$P_{STM} = 4\min(V_{tie}, V_{strut,b}, V_{strut,t}) \quad (8)$$

Trong đó PSTM là khả năng chống chọc thủng của đài, tức tải trọng nén dọc trục đặt ở đỉnh cột làm đài bị phá hoại; V là phản lực thẳng đứng tại một cọc và P = 4V.

3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN PHI TUYẾN TRONG ANSYS

3.1. Phần tử, chia lưới và mô hình vật liệu



Hình 4. Mô hình lưới phần tử ba chiều của đài cọc trong Ansys

Mô hình được thiết lập trên Ansys Mechanical APDL 16 [7], viết bằng ngôn ngữ APDL để mọi thông số hình học và vật liệu đều là biến tham số. Bê tông đài và các đoạn truyền tải dùng phần tử khối SOLID65, cho phép nứt theo ba phương vuông góc tại mỗi điểm tích phân, cho phép nén vỡ và biến dạng dẻo. Cốt thép dùng phần tử thanh hai nút LINK180 với diện tích tiết diện đúng bằng diện tích thanh thép thực, mô hình rời rạc và dùng chung nút với lưới bê tông nên dính bám được coi là tuyệt đối; cách này là điều kiện cần để phân biệt được các phương án bố trí cốt thép khác nhau. Tấm đệm thép ở đỉnh cột và đầu cọc dùng SOLID185 đàn hồi tuyến tính. Vết nứt được mô hình theo hướng phân tán, phù hợp với bản chất mặt phá hoại chọc thủng Hình 4 [7]

Kích thước chia lưới (mesh) phần tử 50 mm được chọn trên cơ sở khảo sát thời gian và sai số mô hình với bốn kích thước 100, 75, 50 và 25 mm trên mô hình một phần tư: ở mức tải 700 kN, chuyển vị lần lượt là 0,176; 0,183; 0,184 và 0,189 mm, tức lưới 50 mm chỉ sai lệch 2,7% so với lưới mịn nhất, trong khi thời gian máy chạy nhanh hơn 5 phút. Do đó nghiên cứu lựa chọn kích thước lưới mesh phần tử là 50 mm.

Phần tử SOLID65 dùng mặt phá hoại năm thông số của Willam và Warnke [8] để xác định trạng thái nứt hoặc nén vỡ dưới trạng thái ứng suất nhiều trục. Cường độ chịu kéo một trục và mô đun đàn hồi của bê tông được xác định từ cường độ chịu nén mẫu trụ theo công thức của EN 1992-1-1:2004 [4] cho bê tông cấp không lớn hơn C50/60:

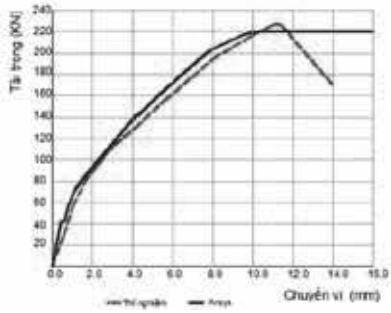
$$f_t = 0,30 \cdot (f_c)^{2/3};\ E_c = 22000 \cdot (f_c/10)^{1/3} \quad [MPa] \quad (9)$$

Hệ số Poisson lấy bằng 0,20; hệ số truyền lực cắt khi vết nứt mở 0,35 và khi vết nứt đóng 0,90. Đường quan hệ ứng suất – biến dạng khi nén khai báo dạng phi tuyến theo EC2 với biến dạng ứng với đỉnh 0,002 và biến dạng cực hạn 0,0035. Cốt thép khai báo tuyến tính với mô đun đàn hồi 200000 MPa, giới hạn chảy và giới hạn bền lấy theo kết quả thí nghiệm kéo thép của từng nhóm mẫu.

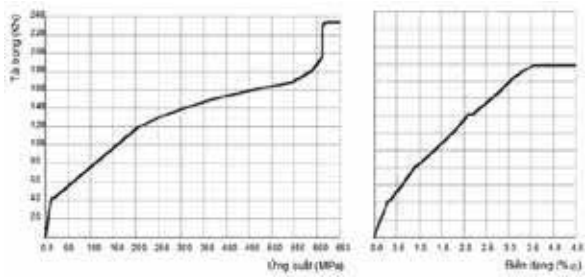
3.2. Điều kiện biên, gia tải và cách xác định khả năng chịu lực

Sơ đồ gối được lý tưởng hóa bằng cách khống chế ba bậc tự do chuyển vị $U_x = U_y = U_z = 0$ tại mặt trên của tấm đệm đầu cột và áp đặt chuyển vị cưỡng bức theo phương đứng tại mặt dưới của bốn tấm đệm đầu cọc. Tải trọng tại mỗi bước gia tải được xác định bằng tổng phản lực tại các nút bị khống chế. Gia tải bằng chuyển vị được sử dụng nhằm đảm bảo khả năng theo dõi đáp ứng của kết cấu trước và sau tải trọng cực đại, khi độ cứng tiếp tuyến giảm mạnh và có thể xuất hiện mất ổn định. Phân tích phi tuyến được thực hiện bằng phương pháp Newton-Raphson với bước tải tự động; số vòng lặp tối đa cho mỗi bước là 100 và tiêu chuẩn hội tụ theo lực được thiết lập ở mức 5%. Chuyển vị δ dùng để vẽ các biểu đồ quan hệ P–δ trong bài là chuyển vị đứng tại chân cột, tức mặt tiếp giáp giữa cột và đài, lấy tương đối so với đầu cọc.

Quan sát biểu đồ P-δ (lực - chuyển vị) Hình 5 để xác định lực phá hoại, tải trọng tăng nhỏ nhưng chuyển vị tăng rất lớn đến vô cùng. Ký hiệu tải trọng tại thời điểm này là P_u. Như vậy $P_{ANSYS} = P_u$ là tung độ đỉnh của đường P–δ, bằng tổng phản lực tại các nút bị khống chế ở đỉnh cột tại bước gia tải cuối cùng còn hội tụ trước khi độ cứng tiếp tuyến triệt tiêu.



Hình 5. Biểu đồ quan hệ (P-δ) từ mô phỏng số và thực nghiệm



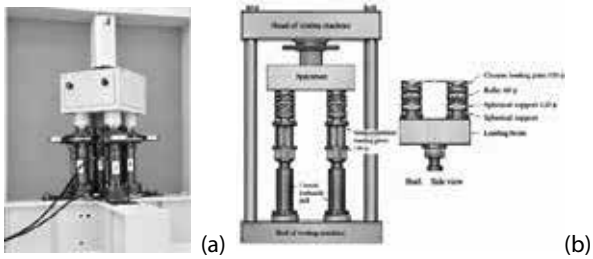
Hình 6. Biểu đồ quan hệ (P- σ) và (P-ε) khi đài cọc bị phá hoại

Nếu đài cọc có khả năng chịu uốn lớn hơn khả năng chịu cắt, thì khi đó biểu đồ quan hệ (P- δ) Hình 5, biến dạng của bê tông quanh vị trí cột vượt qua trạng thái giới hạn nén của bê tông ε_{cu} =0,35%. Tại thời điểm đó cốt thép chưa chảy khi xem trên biểu đồ (P-σ) Hình 6. Nếu gọi P_ε là tải trọng khi biến dạng nén bê tông đài cọc bằng ε_{cu}, P_y là tải trọng khi thép bắt đầu chảy, đài cọc bị phá hoại do cắt chọc thủng $P_\varepsilon < P_y \le P_u$.

Nếu đài cọc có khả năng chịu uốn nhỏ hơn khả năng chịu cắt, thì cốt thép đạt đến giới hạn chảy, sau đó biến dạng nén bê tông mới đạt đến trạng thái giới hạn ε_{cu}, $P_y < P_\varepsilon \le P_u$ khi đó đài cọc bị phá hoại do uốn.

4. TÍNH TOÁN KIỂM CHỨNG MẪU THỰC NGHIỆM

Tiến hành tính toán theo 2 phương pháp mô hình thanh chống giằng và mô hình phỏng số Ansys các bài toán thực nghiệm đài cọc BTCT có phá hoại chọc thủng: ba mẫu thực nghiệm của Clarke [5] như hình 7a, một mẫu của Suzuki và cộng sự [6] như hình 7b. Các thông số hình học và vật liệu thực nghiệm theo Bảng 1, kết quả tính toán theo Bảng 2.



(a) (b)

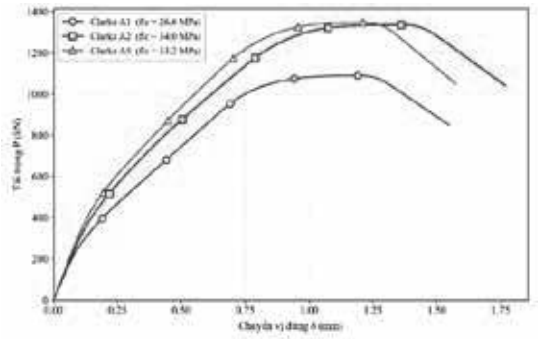
Hình 7. Sơ đồ gia tải thí nghiệm: *(a) mẫu Clarke [5]; (b) mẫu Suzuki [6]*

Bảng 1. Thông số hình học và vật liệu của bốn mẫu kiểm chứng

Mẫu	Đài L×B×h (mm)	lb1 – cạnh cột (mm)	lb2 – cạnh cọc (mm)	h_o (mm)	a/h_o	f'c (MPa)	Bố trí cốt thép đáy	A_s (mm^2)
Clarke A1	950×950×450	200	200	400	0,75	26,6	Lưới đều	785,4 (10φ10)
Clarke A2	950×950×450	200	200	400	0,75	34,0	Dải vuông góc	785,4 (10φ10)
Clarke A5	950×950×450	200	200	400	0,75	33,2	Dải vuông góc	785,4 (10φ10)
Suzuki BPB 35/20-1	800×800×350	200	150	290	0,86	20,4	Lưới đều	641,7 (9D10)

Bảng 2. Kết quả tính toán theo thực nghiệm, mô hình thanh chống giằng và mô phỏng số

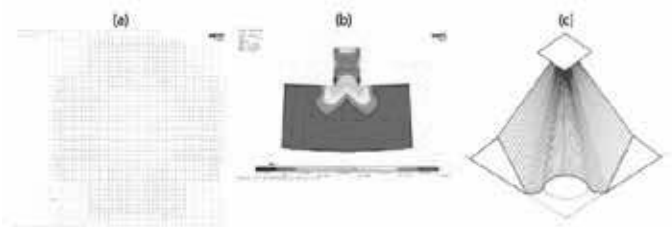
Mẫu	P_{exp} (kN)	P_{STM} (kN)	P_{ANSYS} (kN)	P_{STM}/P_{exp}	P_{ANSYS}/P_{exp}	P_{ANSYS}/P_{STM}
Clarke A1	1110,0	927,4	1089,3	0,835	0,981	1,175
Clarke A2	1420,0	927,4	1335,2	0,653	0,940	1,440
Clarke A5	1400,0	927,4	1346,9	0,662	0,962	1,452
Suzuki BPB 35/20-1	755,0	591,2	689,5	0,783	0,913	1,166



Hình 8. Quan hệ tải trọng-chuyển vị của ba mẫu đài cọc Clarke bằng Ansys

Từ Bảng 2 cho thấy tính theo phương pháp thanh chống giằng STM cho giá trị khả năng chống chọc thủng của đài cọc là nhỏ nhất, tính theo phương pháp mô phỏng số cho kết quả gần thực nghiệm và nhỏ hơn thực nghiệm nên thiên về an toàn. Như vậy mô hình số có độ tin cậy và được sử dụng để khảo sát các tham số ảnh hưởng đến khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT.

Về dạng phá hoại, mô hình số cho thấy vết nứt xuất hiện đầu tiên ở đáy đài theo phương nối tâm hai cọc, sau đó lan theo phương chéo và kết thúc bằng nén vỡ bê tông ngay dưới chân cột (Hình 9a). Ứng suất chính nén tụ thành dải nghiêng từ chân cột xuống đầu cọc (Hình 9b), đúng vị trí thanh chống ở Hình 2. Dạng này trùng với mặt phá hoại Clarke [5] quan sát được (Hình 9c): mở rộng từ chu vi chân cột xuống bốn đầu cọc và lõm vào ở giữa các cọc. Do thí nghiệm chỉ công bố tải trọng phá hoại, không đo độ võng giữa đài cọc, nên chỉ so sánh định lượng được ở tải trọng cực hạn (Bảng 2).



Hình 9. Dạng phá hoại mẫu Clarke A5: *(a) vết nứt và nén vỡ ở đáy đài theo mô phỏng số; (b) ứng suất chính nén trên mặt cắt qua tim đài; (c) hình dạng mặt phá hoại do Clarke đề xuất từ quan sát thực nghiệm [5]*

5. KHẢO SÁT THAM SỐ

5.1. Ảnh hưởng của tỉ số nhịp chịu cắt và chiều cao làm việc (C_o/h_o) [9]

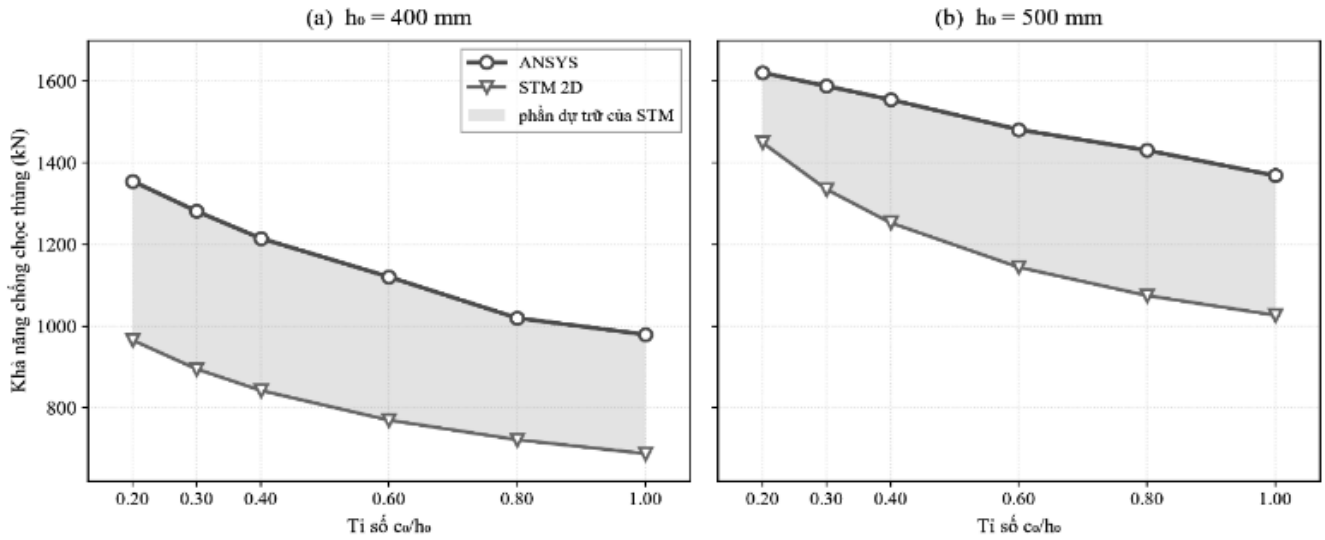
Với 2 trường hợp chiều cao làm việc của đài h_o = 400 mm và h_o = 500 mm, khảo sát KNCCT của đài cọc khi thay đổi tỉ số C_o/h_o từ 0,20 đến 1,00. Kết quả được trình bày theo Bảng 3, Bảng 4 và Hình 10.

Bảng 3. Khả năng chống chọc thủng theo tỉ số c_0/h_0 với h_0 = 400 mm

c_0/h_0	c_0 (mm)	$b_{đài}$ (mm)	θ (độ)	P_{STM} (kN)	P_{ANSYS} (kN)	P_{ANSYS}/P_{STM}
0,20	80	910	78,69	965,6	1355,0	1,403
0,30	120	990	73,30	894,9	1281,2	1,432
0,40	160	1070	68,20	842,4	1214,9	1,442
0,60	240	1230	59,04	769,7	1120,6	1,456
0,80	320	1390	51,34	721,8	1019,8	1,413
1,00	400	1550	45,00	687,8	979,4	1,424

Bảng 4. Khả năng chống chọc thủng theo tỉ số c_0/h_0 với h_0 = 500 mm

c_0/h_0	c_0 (mm)	$b_{đài}$ (mm)	θ (độ)	P_{STM} (kN)	P_{ANSYS} (kN)	P_{ANSYS}/P_{STM}
0,20	100	950	78,69	1449,1	1620,3	1,118
0,30	150	1050	73,30	1334,7	1587,6	1,189
0,40	200	1150	68,20	1252,9	1554,5	1,241
0,60	300	1350	59,04	1144,0	1481,0	1,295
0,80	400	1550	51,34	1074,7	1430,4	1,331
1,00	500	1750	45,00	1026,7	1368,5	1,333



Hình 10. Biểu đồ KNCCT của đài cọc theo tỉ số C_0/h_0 : (a) h_0=400 mm; (b) h_0= 500 mm

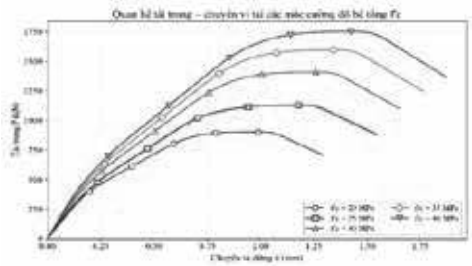
Từ Bảng 3, Bảng 4 và Hình 10 cho thấy khi tăng tỷ số c_0/h_0 (giữ nguyên chiều cao đài cọc và bố trí hệ cọc xa dần mép cột) thì khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT giảm dần. Ngoài ra, so sánh với các tiêu chuẩn bạn đọc có thể tham khảo thêm theo tài liệu tham khảo [9], tính toán theo TCVN 5574-2018, có thể điều chỉnh khả năng chống chọc thủng theo tỷ số c/ho.

5.2. Ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông f'c

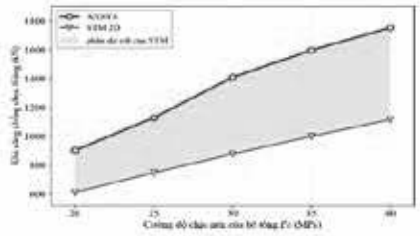
Chọn mẫu Suzuki BPB 35/20-1, khảo sát khả năng chống chọc thủng của đài cọc khi cường độ bê tông thay đổi từ 20 MPa đến 40 MPa. Kết quả được trình bày theo Bảng 5, Hình 11 và Hình 12.

Bảng 5. Khả năng chống chọc thủng theo cường độ chịu nén của bê tông f'c

f'c (MPa)	P_{STM} (kN)	P_{ANSYS} (kN)	P_{ANSYS}/P_{STM}	$P_u/(f'c \cdot A_{cột})$
20	611,2	902,4	1,477	1,128
25	747,3	1128,8	1,510	1,129
30	876,9	1409,3	1,607	1,174
35	999,8	1597,5	1,598	1,141
40	1116,0	1752,7	1,570	1,095



Hình 11. Biểu đồ quan hệ tải trọng-chuyển vị của đài cọc theo f'c



Hình 12. So sánh khả năng chống chọc thủng theo cường độ bê tông f'c

Từ Bảng 5, Hình 11 và Hình 12 cho thấy khi tăng cường độ chịu nén f_c thì khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT cũng tăng, theo mô hình thanh chống giằng thì tăng gần như tuyến tính, còn theo mô phỏng số có dạng đường cong phi tuyến khi f'_c lớn hơn 25 MPa.

5.3. Ảnh hưởng của chiều cao làm việc của đài h_0 (hiệu ứng kích thước)

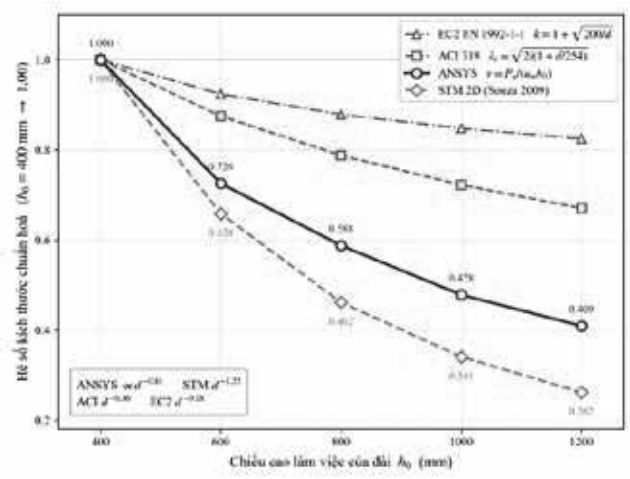
Hiệu ứng kích thước (size effect) khi tăng chiều dày sàn, khả năng chống chọc thủng của đài cọc tăng, tuy nhiên ứng suất chọc thủng cho phép lại giảm đã được kể đến trong ACI 318 [2] qua hệ số λ_s và EC2 [4] hệ số k theo công thức 10:

$$\lambda_s = \sqrt{\left[\frac{2}{1 + d/254}\right]} \le 1{,}0 \; ; k = 1 + \sqrt{\left(\frac{200}{d}\right)} \le 2{,}0 \quad (10)$$

Chọn mẫu Clarke A1, khảo sát khả năng chống chọc thủng của đài cọc khi chiều cao làm việc h_0 thay đổi từ 400 đến 1200 mm, giữ nguyên cường độ bê tông, hàm lượng cốt thép, tiết diện cột, tiết diện cọc và tỉ số $c_0/h_0 = 0{,}25$. Ứng suất chọc thủng đơn vị lấy bằng $v = P_u/(u_m \cdot h_0)$, với u_m là chu vi tiết diện giữa tháp chọc thủng; các giá trị được chuẩn hóa về mốc $h_0 = 400$ mm. Kết quả được trình bày theo Bảng 6 và Hình 13. Hệ số kích thước chuẩn hóa trong Bảng 6 và Hình 13 là tỉ số giữa ứng suất chọc thủng đơn vị ở chiều cao làm việc đang xét và ứng suất đó tại mốc $h_0 = 400$ mm, tức $v(h_0)/v(400)$; hệ số bằng 1,000 tại $h_0 = 400$ mm và càng nhỏ thì hiệu ứng kích thước càng rõ.

Bảng 6. Khả năng chống chọc thủng và hệ số kích thước theo chiều cao làm việc h_0

h_0 (mm)	P_{STM} (kN)	P_{ANSYS} (kN)	v_{STM} (MPa)	v_{ANSYS} (MPa)	Hệ số kích thước chuẩn hóa (h_0 = 400 mm → 1,000)			
					ANSYS	STM	ACI 318 λ_s	EC2 k
400	1956,1	1340,2	4,075	2,792	1,000	1,000	1,000	1,000
600	2253,6	1701,8	2,683	2,026	0,726	0,658	0,875	0,924
800	2407,7	2100,5	1,881	1,641	0,588	0,462	0,788	0,879
1000	2499,0	2403,8	1,388	1,335	0,478	0,341	0,722	0,848
1200	2558,3	2741,6	1,066	1,142	0,409	0,262	0,671	0,825



Hình 13. Hệ số kích thước chuẩn hóa theo chiều cao làm việc của đài h_0

Từ Bảng 6 và Hình 13 cho thấy theo khảo sát tính các phương pháp thì đều thấy rõ ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước. Tính theo mô phỏng số và STM thì hệ số kích thước giảm khá nhanh khi tăng chiều dày của đài lên gấp 2-3 lần. Cần có thêm các thực nghiệm để kiểm chứng tham số này.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã tính toán khả năng chống chọc thủng của đài cọc BTCT theo mô hình thanh chống-giằng và mô hình mô phỏng số trong phần mềm Ansys viết bằng ngôn ngữ APDL. Kết quả nghiên cứu tính toán cho thấy sử dụng mô hình thanh chống giằng phù hợp với tính toán đài cọc, thiên về an toàn, và có thể dễ dàng lập được các bảng tính. Tính theo mô hình mô phỏng số cho kết quả gần với thực nghiệm, khảo sát được nhiều tham số hơn. Kết quả khảo sát cho thấy có thể điều chỉnh thay đổi khả năng chống chọc thủng của đài cọc theo tỷ số h_0/C_0, cường độ chịu nén của bê tông để được chiều cao đài cọc hợp lý. Khi chiều cao đài cọc lớn trong nhà nhiều tầng, đài cọc đỡ thang máy cần kể đến hiệu ứng kích thước (size effect) trong tính toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng, TCVN 5574:2018. Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế. Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, 2018.

[2] ACI 318-2025. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2025.

[3] EN 1992-1-1:2023. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2023.

[4] EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2004.

[5] J. L. Clarke. Behaviour and design of pile caps with four piles. Technical Report No. 42.489, Cement and Concrete Association, London, pp. 1-19, 1973.

[6] K. Suzuki, K. Otsuki, T. Tsubata. Influence of bar arrangement on ultimate strength of four-pile caps. ACI Structural Journal, vol. 95, no. 2, pp. 195-203, 1998.

[7] ANSYS, Inc. Theory Reference, Release 16.0. ANSYS Documentation, 2015.

[8] K. J. Willam, E. P. Warnke. Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete. IABSE Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Bergamo, vol 19, pp. 1-30, 1975.

[9] Trần Việt Tâm. Nghiên cứu khả năng chống chọc thủng của đài cọc bê tông cốt thép bằng mô phỏng số. Tạp chí Xây dựng - Bộ Xây dựng, số 9, tr. 204-208, 2025.

■ Ngày nộp bài: 08/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/11/2026

Phân tích phản ứng dao động của dầm chịu hoạt tải di động hai bậc tự do và tải trọng tập trung di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Analysis of the vibration response of beams subjected to a moving two-degree-of-freedom vehicle load and a moving concentrated load using the finite element method

> THS NGUYỄN NGỌC LÂM
Khoa Công trình và Môi trường, Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: nngoclamkc@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của lực quán tính của hoạt tải di động đến phản ứng dao động của dầm. Hai mô hình tải trọng được xem xét gồm lực tập trung di động và hoạt tải di động có khối lượng. Phương trình dao động của hệ được thiết lập bằng phương pháp phần tử hữu hạn và giải số thông qua chương trình tính toán xây dựng trên Matlab. Trên cơ sở kết quả tính toán, phản ứng động của dầm trong hai mô hình được phân tích và so sánh thông qua các đại lượng như độ võng và hệ số động. Nghiên cứu đồng thời khảo sát ảnh hưởng của khối lượng và vận tốc hoạt tải đến phản ứng của kết cấu. Mục tiêu của bài báo so sánh phản ứng động lực học giữa mô hình tải trọng tập trung di động và mô hình có xét đến lực quán tính của hoạt tải, từ đó góp phần lựa chọn mô hình tính phù hợp, bảo đảm độ chính xác cần thiết nhưng không làm tăng quá mức khối lượng tính toán trong thiết kế kết cấu dầm chịu tải trọng di động.

Từ khóa: Dầm; dao động; tải trọng di động; phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

This paper investigates the influence of moving load inertia on the dynamic response of beams. Two loading models are considered: A moving concentrated force and a moving vehicle. The governing equations of motion are formulated using the finite element method and numerically solved using a computational program developed in MATLAB. Based on the numerical results, the dynamic responses of the beam predicted by the two models are analyzed and compared in terms of deflection and dynamic amplification factor. The effects of the moving load mass and velocity on the structural response are also investigated. The primary objective of this study is to evaluate the differences in the dynamic responses predicted by the moving force and moving mass models, thereby providing insights into the selection of an appropriate loading model that achieves the required level of accuracy without imposing excessive computational costs in the design and analysis of beams subjected to moving loads.

Keywords: Beam; dynamics; moving load; FEM.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện về động lực học của dầm và tấm chịu hoạt tải di động, với các mô hình từ lực tập trung di động đến hệ dao động một, hai và nhiều bậc tự do. Mô hình càng nhiều bậc tự do càng có khả năng mô tả sát ứng xử thực tế của hệ, nhưng đồng thời làm tăng độ phức tạp và khối lượng tính toán. Trong khi đó, các bài toán thiết kế đòi hỏi mô hình vừa bảo đảm độ chính xác cần thiết, vừa đơn giản và hiệu quả tính toán. Vì vậy, việc lựa chọn mô hình hoạt tải phù hợp nhằm cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn.

Ở Việt Nam, dao động của dầm và kết cấu cầu chịu tải trọng di động cũng đã được nhiều tác giả quan tâm. Hoàng Hà [1] khảo sát dao động uốn của cầu dây văng dưới tác dụng của hoạt tải khai thác. Tạ Hữu Vinh [2] sử dụng phương pháp số để phân tích hệ thanh chịu tải trọng di động, trong khi Nguyễn Xuân Toản [3] nghiên cứu tương tác giữa xe và cầu dầm có xét đến lực hãm. Le Thi Hà và cộng sự [4] đã đánh giá ảnh hưởng của cản đến phản ứng dao động của dầm vi mô cơ tính biến thiên có vết nứt chịu tải trọng di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Phạm Thị Bá Liên [5] đã phát triển phương pháp phần tử hữu hạn xét đến phi tuyến hình học tính dao động của dầm cơ tính biến thiên theo chiều dọc dầm chịu tải trọng di động.

Trên thế giới, bài toán kết cấu chịu tải trọng di động đã được nghiên cứu theo nhiều hướng, rất đa dạng, phong phú. Lin và Trethewey [6] xây dựng mô hình phần tử hữu hạn cho dầm chịu hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn- khối lượng, kết quả có đánh giá hệ số

động cho dầm đơn giản và dầm hai đầu ngàm. Michaltsos và cộng sự [7] nghiên cứu ảnh hưởng của khối lượng và vận tốc tải đến đáp ứng động của dầm đơn giản, cho thấy quán tính của khối lượng di động có thể ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng kết cấu. Lee [8] mở rộng bài toán cho dầm Timoshenko trên nền Winkler và chỉ ra sự khác biệt giữa mô hình tải trọng tập trung di động và khối lượng di động, đặc biệt khi vận tốc tải tăng.

Bên cạnh việc xác định đáp ứng động học, hệ số động là một chỉ tiêu quan trọng để đánh giá ảnh hưởng động của tải trọng di động. Savin [9] thiết lập các biểu thức giải tích của phản ứng dao động và hệ số động cho dầm chịu đoàn tải trọng tập trung di động, cho phép đánh giá nhanh hệ số động và đặc biệt phù hợp với bài toán cầu đường sắt tốc độ cao. Azam và cộng sự [10] so sánh đáp ứng động của dầm Timoshenko dưới tác dụng của khối lượng di động và hệ khối lượng có lò xo, qua đó làm rõ ảnh hưởng của mô hình tải đến đáp ứng đọng. Cheng và cộng sự [11] tiếp tục khảo sát hệ số động của dầm đơn giản chịu tải di động, chỉ ra vai trò của vận tốc, tần số riêng, chiều dài nhịp và tỷ số giữa chiều dài cầu với chiều dài đoàn tải.

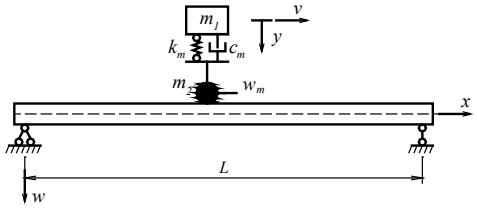
Các nghiên cứu gần đây tiếp tục phát triển các mô hình có độ chính xác cao hơn. Zhang và cộng sự [12] chỉ ra rằng lựa chọn lý thuyết Euler–Bernoulli hay Timoshenko có thể tạo ra khác biệt đáng kể trong dự báo đáp ứng động của dầm liên tục trên các gối tựa đàn hồi đều chịu tải di động. Di Matteo [13] xây dựng nghiệm giải tích gần đúng cho dầm chịu hệ dao động di động có xét cản và điều kiện biên tổng quát. Nhìn chung, mô hình tải càng chi tiết càng có khả năng phản ánh đầy đủ tương tác tải-kết cấu, nhưng đồng thời làm tăng số tham số và khối lượng tính toán. Do đó, việc đánh giá mức độ ảnh hưởng của mô hình tải đến đáp ứng và hệ số động, từ đó lựa chọn mô hình đủ chính xác nhưng đơn giản cho tính toán thiết kế, vẫn là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn.

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu về dao động của dầm chịu các mô hình tải trọng di động, phần lớn các nghiên cứu tập trung tính toán phản ứng của từng mô hình riêng biệt. Việc so sánh trực tiếp giữa mô hình lực tập trung di động và mô hình hoạt tải di động có khối lượng để làm rõ ảnh hưởng của lực quán tính vẫn còn hạn chế. Trong thực hành thiết kế, mô hình lực tập trung di động thường được sử dụng do đơn giản và có khối lượng tính toán nhỏ. Ngược lại, mô hình hoạt tải có khối lượng cho phép xét đến lực quán tính và sự tương tác giữa hoạt tải với kết cấu, nhưng việc thiết lập và giải bài toán phức tạp hơn.

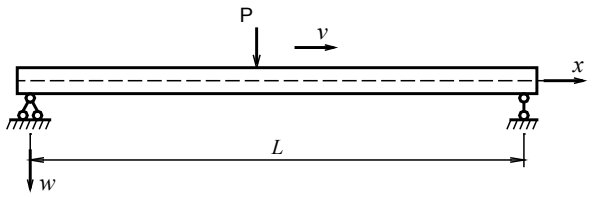
Xuất phát từ vấn đề trên, bài báo thiết lập phương trình dao động tuyến tính của dầm chịu hai dạng tải trọng gồm lực tập trung di động và hoạt tải di động có khối lượng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Chương trình tính toán được xây dựng trên Matlab nhằm phân tích độ võng và hệ số động của dầm. Trên cơ sở đó, nghiên cứu so sánh phản ứng động của dầm trong hai mô hình, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của khối lượng và vận tốc hoạt tải.

2. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN CỦA DẦM CHỊU TẢI TRỌNG DI ĐỘNG

Nghiên cứu hai mô hình dầm chịu hoạt tải hai bậc tự do như Hình 1 và chịu lực tập trung di động như Hình 2:



Hình 1. Mô hình dầm chịu hoạt tải 2 bậc tự do

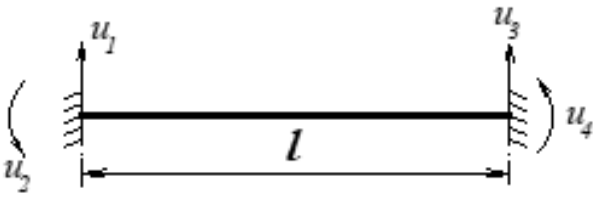


Hình 2. Mô hình dầm chịu tải trọng tập trung di động

Trong nghiên cứu này, để so sánh đánh giá hiệu ứng lực quán tính của khối lượng hoạt tải, ở mô Hình 2 tải trọng di động P lấy bằng trọng lượng của hoạt tải ở mô hình trong Hình 1:

$$P = (m_1 + m_2)g \tag{1}$$

Trong nghiên cứu này, chúng ta sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán vì khi tính chất của nền là ngẫu nhiên thì phương pháp bán giải tích gần như không thể tính toán được. Với dầm chúng ta sử dụng dạng phần tử dầm hai nút có bốn bậc tự do như mô tả ở Hình 3:



Hình 3. Phần tử dầm hai nút

Phần tử dầm sử dụng hàm dạng Hecmite để xấp xỉ trường chuyển vị, cụ thể các hàm dạng như sau:

$$[N] = \langle N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4 \rangle$$
$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 \qquad N_2 = x\left(\frac{x}{l} - 1\right)^2$$
$$N_3 = 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 \qquad N_4 = x\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{x}{l}\right] \tag{2}$$

Chuyển vị $w(x,t)$ của phần tử có thể viết dưới dạng:

$$w_e(x,t) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4]\begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{Bmatrix} = [N(x)]\{u_e(t)\}$$

Hệ phương trình dao động của dầm chịu hoạt tải di động hai bậc tự do sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn có dạng như sau [14]:

- Phương trình cho dầm khi xét đến cản:

$$[M^b]\{\ddot{u}\} + [C^b]\{\dot{u}\} + ([K^b])\{u\} = \{N\}^T f_w \tag{4}$$

- Phương trình cho khối lượng m_1 :

$$m_1\ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{w}_m) + k(y - w_m) = 0 \tag{5}$$

Trong đó:

$$f_w = (m_1 + m_2)g - m_2\ddot{w}_m + F_{m1} \tag{6}$$

và:

$$F_{m1} = k(y - w_m) + c(\dot{y} - \dot{w}_m) = -m_1\ddot{y} \tag{7}$$

Các đại lượng trong các phương trình trên:

w_m là chuyển vị của khối lượng m_2

$[M^b]$, $[K^b]$ lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận độ cứng của dầm.

Với hệ chịu lực tập trung di động như Hình 2 thì lực tương tác f_w có dạng như sau:

$$f_w = P = (m_1 + m_2)g \tag{8}$$

Phương trình (4) có thể viết cụ thể hơn như sau:

$$\begin{bmatrix} [M^b] + [\hat{m}] & \{0\} \\ \{0\} & m_1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C]^b & 0 \\ -c\{N\} & c \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} [K^b] + [\hat{k}] & 0 \\ -c\dot{x}\frac{d\{N\}}{dx} - k\{N\} & k \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u \\ y \end{Bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \{N\}^T(m_1 + m_2)g \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

Ma trận khối lượng của phần tử:

$$[m]_e = \frac{ml}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ma trận độ cứng của phần tử:

$$[k^b]_e = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. GIẢI PHƯƠNG TRÌNH DAO ĐỘNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP SAI PHÂN HỮU HẠN THEO LƯỢC ĐỒ WILSON-θ

Phương trình dao động có thể viết dạng:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (12)$$

Trong đó: $[M], [C], [K], \{P(t)\}$ là ma trận khối lượng, ma trận cản, ma trận độ cứng, vector tải trọng. Các vector $\{u(t)\}, \{\dot{u}(t)\}, \{\ddot{u}(t)\}$ là vector chuyển vị, vận tốc và gia tốc.

Để giải phương trình (12) bằng phương pháp Wilson [15-17] ta có đại lượng ma trận độ cứng $[\widehat{K}]$ hữu hiệu như sau:

$$[\widehat{K}] = [K] + a_0[M] + a_1[C] \quad (13)$$

Vector tải $\hat{P}(t+\theta)$ ở thời điểm $t+\theta$ có thể xác định như sau:

$$\{\hat{P}(t+\theta)\} = \{P(t)\} + \theta(\{P(t+\theta)\} - \{P(t)\}) + \dots$$
$$[M](a_0\{\dot{u}(t)\} + a_1\{\dot{u}(t)\} + a_2\{\ddot{u}(t)\}) +$$
$$[C](a_1\{\dot{u}(t)\} + a_4\{\dot{u}(t)\} + a_5\{\ddot{u}(t)\}) \quad (14)$$

Trong đó, các hệ số:

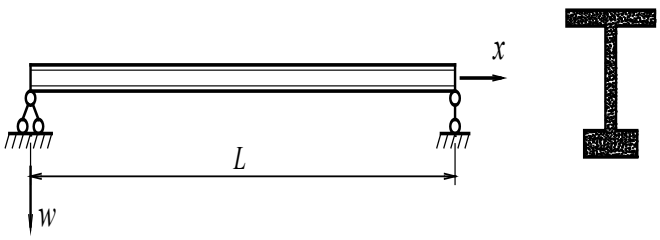
$$a_0 = \frac{1}{\beta(\theta\Delta t)^2};\ a_1 = \frac{\gamma}{\beta\theta\Delta t};\ a_2 = \frac{1}{\beta\theta\Delta t};\ a_4 = \frac{\gamma}{\beta} - 1;\ a_5 = \left(\frac{\gamma}{\beta} - 2\right)\frac{\theta\Delta t}{2}$$

Tham số γ, β và θ chọn như sau$\gamma = 1/2, \beta = 1/6$ and $\theta \geq 1.37$.

4. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

So sánh phản ứng dao động của dầm đơn giản chịu tải trọng di động.

Thực hiện tính toán với dầm đơn giản nhịp L=30, mặt cắt dạng chữ I như Hình 4. Mô-đun đàn hồi của vật liệu E=32Gpa.



Hình 4. Mô hình dầm I

Từ bảng tính chất của vật liệu và tính các đặc trưng hình học của dầm của dầm ta tính được:

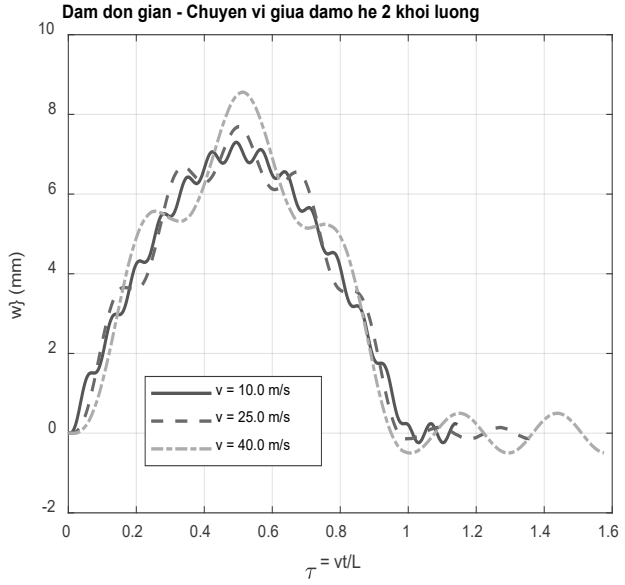
I=0,55 (m^4)

$m = 2500(Kg/m)$

Trong nghiên cứu này, hệ số động được tính toán như nhau:

$$HSD = \frac{CV_d^{max}}{CV_t^{max}} \quad (15)$$

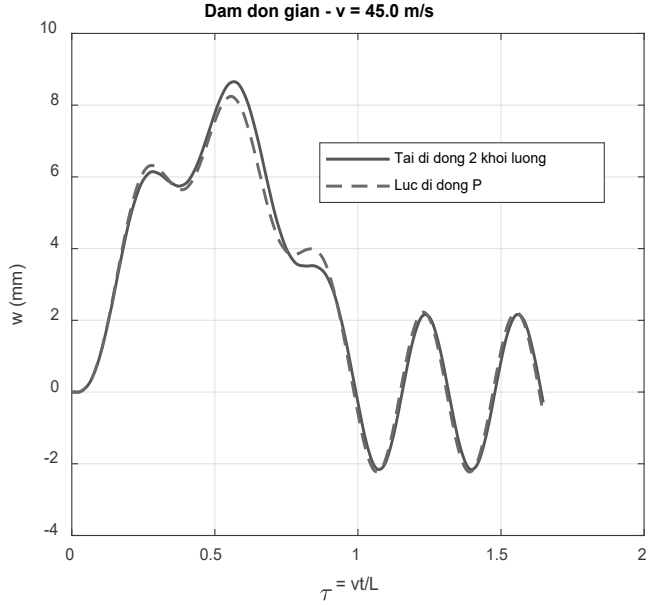
Trong đó: $HSD = \frac{CV_d^{max}}{CV_t^{max}}$ lần lượt là chuyện vị tĩnh lớn nhất tại giữa nhịp do tải trọng động và do hoạt tải di động tĩnh gây ra.



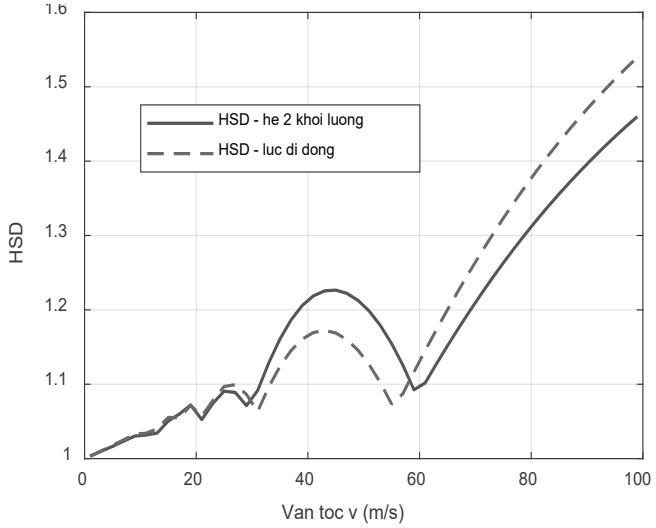
Hình 5. Biểu đồ chuyển vị ở giữa dầm do hoạt tải di động hai khối lượng gây ra với các vận tốc lần lượt 10, 25, 40 (m/s)

Hình 5 cho thấy chuyển vị tại giữa dầm biến thiên theo thời gian khi hoạt tải di động hai khối lượng chuyển động với các vận tốc khác nhau. Khi vận tốc tăng từ 10 m/s lên 25 m/s và 40 m/s, biên độ và dạng dao động của dầm có sự thay đổi rõ rệt, thể hiện ảnh hưởng của vận tốc tải trọng đến phản ứng động của kết cấu. Kết quả cho thấy cần xét đến vận tốc hoạt tải khi phân tích dao động của dầm chịu tải trọng di động.

Hình 6 so sánh chuyển vị tại giữa dầm dưới tác dụng của hoạt tải di động hai khối lượng và lực tập trung di động ở cùng vận tốc 45 m/s. Hai mô hình cho kết quả chuyển vị có sự khác biệt về biên độ và diễn biến dao động, cho thấy việc xét đến khối lượng và lực quán tính của hoạt tải có ảnh hưởng đến phản ứng động của dầm. Do đó, mô hình lực tập trung di động tuy đơn giản hơn nhưng có thể chưa phản ánh đầy đủ ứng xử động của kết cấu.



Hình 6. Biểu đồ chuyển vị ở giữa dầm do hoạt tải di động và tải trọng tập trung di động gây ra



Hình 7. Biểu đồ hệ số động của chuyển vị ở giữa dầm do hoạt tải di động và tải trọng tập trung di động gây ra

Hình 7 thể hiện sự biến thiên của hệ số động theo vận tốc tải trọng đối với hai mô hình tải di động. Hệ số động của cả hai mô hình đều thay đổi theo vận tốc và có sự khác biệt nhất định, cho thấy ảnh hưởng của lực quán tính hoạt tải đến mức độ khuếch đại chuyển vị của dầm. Vì vậy, việc lựa chọn mô hình tải trọng cần căn cứ vào vận tốc khai thác và yêu cầu độ chính xác của bài toán phân tích động lực học.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình phần tử hữu hạn và chương trình Matlab để phân tích phản ứng dao động của dầm chịu lực tập trung di động và hoạt tải di động có xét đến khối lượng. Một số nhận xét từ các kết quả tính toán cụ thể trong nghiên cứu này:

- Vận tốc hoạt tải ảnh hưởng rõ rệt đến biên độ và diễn biến chuyển vị tại giữa nhịp. Khi vận tốc thay đổi, phản ứng dao động của dầm cũng thay đổi đáng kể, cho thấy cần xét đến vận tốc hoạt tải trong phân tích động lực học kết cấu.

- Hai mô hình tải trọng cho kết quả chuyển vị khác nhau tại cùng vận tốc. Việc xét đến khối lượng và lực quán tính của hoạt tải có ảnh hưởng đến phản ứng động của dầm, do đó mô hình lực tập trung di động cần được cân nhắc khi áp dụng cho các bài toán yêu cầu độ chính xác cao.

- Hệ số động của cả hai mô hình đều biến đổi theo vận tốc và có sự khác biệt nhất định. Vì vậy, lựa chọn mô hình tải trọng cần căn cứ vào điều kiện khai thác và yêu cầu độ chính xác của bài toán.

Kết quả nghiên cứu khẳng định khả năng ứng dụng của phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với phương pháp Wilson-θ trong phân tích dao động của dầm chịu tải trọng di động, đồng thời cung cấp cơ sở tham khảo để lựa chọn mô hình tính toán phù hợp giữa độ chính xác và hiệu quả tính toán.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong Đề tài mã số T2026-CT-016.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H. Hà. Nghiên cứu dao động uốn phi tuyến của kết cấu nhịp cầu dây văng chịu tác dụng của hoạt tải khai thác (Đề tài NCKH cấp Bộ), Trường Đại học Giao thông vận tải, 2002.

[2] Tạ Hữu Vinh. Nghiên cứu dao động của kết cấu hệ thanh chịu tải trọng di động bằng phương pháp số. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

[3] N. X. Toan. Bending vibration of beam element under moving loads with considering vehicle braking forces. Vietnam Journal of Mechanics, vol. 33, 2011.

[4] L. T. Ha and T. Van Lien. Effect of the damping model to dynamic responses of the cracked functionally graded microbeams on the elastic foundation subjected to moving load. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 47, no. 7, p. 312, 2025/05/16 2025.

[5] P. T. B. Lien. Geometrically nonlinear response of axially functionally graded beams subjected to a moving load. Transport and Communications Science Journal, vol. 77, no. 4, pp. 446-458, 2026.

[6] Y. H. Lin and M. W. Trethewey. Finite element analysis of elastic beams subjected to moving dynamic loads %J Journal of Sound and Vibration, vol. 136, no. 2, pp. 323-342, 1990.

[7] G. Michaltsos, D. Sophianopoulos and A. N. Kounadis. The effect of a moving mass and other parameters on the dynamic response of a simply supported beam %J Journal of Sound and Vibration, vol. 191, no. 3, pp. 357-362, 1996.

[8] H. P. Lee. Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass %J Applied Acoustics, vol. 55, no. 3, pp. 203-215, 1998.

[9] E. Savin. Dynamic amplification factor and response spectrum for the evaluation of vibrations of beams under successive moving loads %J Journal of Sound and Vibration, vol. 248, no. 2, pp. 267-288, 2001.

[10] S. Eftekhar Azam, M. Mofid, and R. Afghani Khoraskani. Dynamic response of Timoshenko beam under moving mass %J Scientia Iranica, vol. 20, no. 1, pp. 50-56, 2013.

[11] Z. Cheng, N. Zhang, C. Gao, X. Du and S. Zhou. Amplification factor analysis of a simply supported beam under moving loads %J Advances in Mechanical Engineering, vol. 14, no. 7, 2022.

[12] X. Zhang, D. Thompson and X. Sheng. Differences between Euler-Bernoulli and Timoshenko beam formulations for calculating the effects of moving loads on a periodically supported beam %J Journal of Sound and Vibration, vol. 481, p. 115432, 2020.

[13] A. Di Matteo. Dynamic response of beams excited by moving oscillators: Approximate analytical solutions for general boundary conditions %J Computers & Structures, vol. 280, p. 106989, 2023.

[14] T. D. Hien, N. D. Hung, N. T. Kien and H. C. Noh. The variability of dynamic responses of beams resting on elastic foundation subjected to vehicle with random system parameters. Applied Mathematical Modelling, vol. 67, pp. 676-687, 03/01/2019.

[15] P. Paultre. Dynamics of Structures (in English), 2013.

[16] E. L. Wilson, I. Farhoomand and K. J. Bathe. Nonlinear dynamic analysis of complex structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 1, no. 3, pp. 241-252, 1972.

[17] K.-J. Bathe, Finite element procedures. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 2014.

■Ngày nhận bài: 15/9/2026 ■Ngày sửa bài: 21/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 29/9/2026

Xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn ở Việt Nam: Phân tích cực trị và mô phỏng Monte Carlo

Determination of design wind speed for long-span bridges in Vietnam: Extreme-value analysis and Monte Carlo simulation

> HOÀNG TRỌNG LÂM
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng
Email: htlam@dut.udn.vn

TÓM TẮT

Vận tốc gió thiết kế là thông số đầu vào quan trọng trong thiết kế chịu gió của cầu nhịp lớn, đặc biệt đối với cầu dây văng và cầu treo dây võng có độ mảnh lớn và nhạy cảm với các tác động khí động. Việc sử dụng trực tiếp vận tốc gió phân vùng theo các tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam có thể chưa phản ánh đầy đủ đặc điểm khí hậu gió và ảnh hưởng của bão nhiệt đới tại vị trí xây dựng. Bài báo tổng quan cơ sở xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn, tập trung vào hai phương pháp gồm mô phỏng bão Monte Carlo và phân tích giá trị cực trị theo phân bố Gumbel. Các vấn đề liên quan đến xử lý số liệu quan trắc, xác định chu kỳ lặp, chuẩn hóa điều kiện địa hình, cao độ và thời gian lấy trung bình của vận tốc gió được phân tích dưới góc độ ứng dụng trong thiết kế. Phương pháp Gumbel được minh họa chi tiết trên một chuỗi số liệu vận tốc gió cực đại năm, qua đó trình bày quy trình xác định vận tốc gió tương ứng với các chu kỳ lặp khác nhau và khả năng áp dụng cho một vị trí công trình cụ thể. Trên cơ sở phân tích phạm vi áp dụng của phương pháp Gumbel, mô phỏng Monte Carlo và các quy định thiết kế hiện hành, bài báo đề xuất quy trình xác định và lựa chọn vận tốc gió thiết kế theo vị trí nhằm hỗ trợ thiết kế chịu gió cho các cầu nhịp lớn ở Việt Nam.

Từ khóa: Cầu nhịp lớn; vận tốc gió thiết kế; phân tích giá trị cực trị; phân bố Gumbel; mô phỏng Monte Carlo; chu kỳ lặp.

ABSTRACT

Design wind speed is a key input parameter in the wind-resistant design of long-span bridges, particularly cable-stayed and suspension bridges, which are characterized by high slenderness and sensitivity to aerodynamic effects. Direct adoption of regionally specified wind speeds from current Vietnamese design standards may not fully represent site-specific wind climate characteristics and the influence of tropical cyclones at the bridge location. This paper reviews the basis for determining design wind speeds for long-span bridges, with particular emphasis on two approaches: typhoon Monte Carlo simulation and extreme-value analysis based on the Gumbel distribution. Issues related to the processing of observational data, determination of return periods, and standardization with respect to terrain conditions, elevation, and wind-speed averaging time are examined from a practical design perspective. The Gumbel method is illustrated in detail using a series of annual maximum wind speeds, thereby demonstrating the procedure for estimating wind speeds corresponding to different return periods and its applicability to a specific bridge site. Based on an assessment of the applicability of the Gumbel method, Monte Carlo simulation, and current design provisions, a site-specific procedure for determining and selecting design wind speeds is proposed to support the wind-resistant design of long-span bridges in Vietnam.

Keywords: Long-span bridge; design wind speed; extreme-value analysis; Gumbel distribution; Monte Carlo simulation; return period.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển của hệ thống giao thông cùng với yêu cầu vượt các cửa sông, eo biển và luồng hàng hải lớn đã dẫn đến việc ngày càng nhiều cầu dây văng và cầu treo dây võng có nhịp lớn được nghiên cứu, xây dựng và đưa vào khai thác. So với cầu nhịp ngắn và trung bình, cầu nhịp lớn thường có độ mềm cao, tần số dao động riêng thấp và độ cản kết cấu nhỏ, do đó tác động của gió có thể trở thành một trong những yếu tố chi phối quá trình thiết kế. Bên cạnh tải trọng gió tĩnh, vận tốc gió còn là thông số cơ sở trong đánh giá đáp ứng buffeting, dao động do xoáy, mất ổn định flutter, galloping của

các bộ phận kết cấu và trạng thái chịu gió trong các giai đoạn thi công [1 - 4]. Vì vậy, xác định hợp lý vận tốc gió thiết kế tại vị trí xây dựng có ý nghĩa trực tiếp đối với độ an toàn, độ tin cậy và hiệu quả kinh tế của cầu nhịp lớn.

Trong thực hành thiết kế, vận tốc gió cơ bản thường được xác định từ các bản đồ hoặc bảng phân vùng gió được thiết lập trên cơ sở thống kê số liệu khí tượng dài hạn. Tại Việt Nam, TCVN 11823-3:2017 là tiêu chuẩn hiện hành về tải trọng và hệ số tải trọng trong thiết kế cầu đường bộ [5]. Đối với tải trọng gió, tiêu chuẩn cung cấp các giá trị vận tốc gió cơ bản theo vùng và quy định hiệu chỉnh theo điều kiện lộ thiên cũng như cao độ công trình. Cách tiếp cận này thuận tiện đối với thiết kế cầu thông thường, nhưng về bản chất giá trị vận tốc gió thu được vẫn mang tính phân vùng, trong khi điều kiện khí hậu gió tại một vị trí cầu cụ thể có thể chịu ảnh hưởng đáng kể của địa hình, khoảng cách tới bờ biển, cửa sông, hướng gió chủ đạo và đặc biệt là sự xuất hiện của bão nhiệt đới.

Hệ thống số liệu khí hậu phục vụ xây dựng tại Việt Nam đã được cập nhật thông qua QCVN 02:2022/BXD [6]. Quy chuẩn cung cấp số liệu gió dưới dạng bản đồ phân vùng áp lực gió và phân vùng theo địa danh hành chính, đồng thời quy định các điều kiện tham chiếu về thời gian lấy trung bình, cao độ và dạng địa hình, cũng như các hệ số chuyển đổi theo chu kỳ lặp. TCVN 2737:2023 [7], thay thế TCVN 2737:1995, tiếp tục cập nhật cơ sở xác định tải trọng gió cho nhà và công trình.

Đáng chú ý, QCVN 02:2022/BXD quy định rằng đối với các công trình đặc biệt hoặc nhạy cảm với tải trọng gió, bao gồm cầu dây văng nhịp lớn, cầu dài và công trình tại khu vực địa hình phức tạp, cần sử dụng số liệu từ các nghiên cứu riêng. Quy định này cho thấy giá trị gió phân vùng chỉ đóng vai trò cơ sở chung và chưa thay thế được việc đánh giá khí hậu gió theo vị trí đối với cầu nhịp lớn. Tuy nhiên, quy chuẩn hiện chưa trình bày một quy trình kỹ thuật đầy đủ để xác định vận tốc gió thiết kế từ số liệu khí tượng quan trắc, bao gồm lựa chọn trạm đại diện, kiểm tra tính đồng nhất của chuỗi số liệu, hiệu chỉnh theo cao độ và độ nhám, chuẩn hóa thời gian lấy trung bình, lựa chọn mô hình cực trị và xử lý riêng ảnh hưởng của bão nhiệt đới. Bên cạnh đó, mặc dù QCVN 02:2022/BXD đã nêu cơ quan xây dựng số liệu và các điều kiện tham chiếu chính của bản đồ gió, các thông tin chi tiết về bộ dữ liệu khí tượng gốc, thời đoạn quan trắc tại từng trạm, quy trình đồng nhất hóa số liệu và phương pháp ngoại suy cực trị chưa được trình bày đầy đủ trong quy chuẩn. Vì vậy, quá trình chuyển từ số liệu quan trắc ban đầu đến giá trị vận tốc trên bản đồ khó được tái lập trực tiếp từ nội dung công bố. Điều này đặt ra nhu cầu xây dựng một quy trình minh bạch và có khả năng kiểm chứng để xác định vận tốc gió theo vị trí (site-specific) cho các công trình cầu đặc biệt.

Một vấn đề quan trọng khác là sự khác nhau giữa các định nghĩa vận tốc gió sử dụng trong tiêu chuẩn và trong các nghiên cứu khí động. Vận tốc gió giật 3s, vận tốc trung bình 10 phút và vận tốc trung bình giờ không thể so sánh hoặc sử dụng thay thế trực tiếp nếu chưa được quy đổi về cùng điều kiện tham chiếu. Tương tự, vận tốc đo tại trạm khí tượng trên đất liền có thể không đại diện trực tiếp cho điều kiện gió tại cầu nằm trên cửa sông hoặc vùng biển mở. Do đó, việc thống nhất thời gian lấy trung bình, cao độ, độ nhám bề mặt và chu kỳ lặp là bước cần thiết trước khi sử dụng vận tốc gió trong tính toán tải trọng, thí nghiệm hầm gió hoặc tính toán ổn định buffeting cho cầu nhịp lớn.

Kinh nghiệm quốc tế cũng cho thấy đối với cầu nhịp đặc biệt lớn, việc xác định các đặc trưng khí hậu gió tại vị trí công trình thường được thực hiện như một nội dung nghiên cứu riêng thay vì chỉ lấy trực tiếp giá trị từ bản đồ gió. Hướng dẫn thiết kế chịu gió cầu ở Nhật Bản và tiêu chuẩn thiết kế chịu gió cầu đường bộ của Trung Quốc đều xem vận tốc gió thiết kế, điều kiện địa hình và đặc trưng nhiễu động là các đầu vào cơ bản trước khi kiểm tra ổn định khí động và tiến hành thí nghiệm hầm gió [2 - 4]. Cách tiếp cận này phản ánh đặc điểm quan trọng của cầu nhịp lớn: vận tốc gió thiết kế không chỉ là tham số để tính áp lực gió tĩnh mà còn là vận tốc tham chiếu để xác định miền vận tốc kiểm tra các hiện tượng khí đàn hồi và thiết lập điều kiện dòng khí trong thí nghiệm mô hình.

Về mặt xác suất, phân tích giá trị cực trị là một phương pháp phổ biến để xác định quan hệ giữa vận tốc gió và chu kỳ lặp. Trong đó, phân bố cực trị loại I (Gumbel) được sử dụng rộng rãi cho chuỗi vận tốc gió cực đại năm [8, 9]. Từ các giá trị cực đại quan trắc, có thể xây dựng hàm phân bố và ngoại suy vận tốc VTV-tương ứng với chu kỳ lặp TT. Cho [10] đã áp dụng phương pháp này để xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn tại các vùng ven biển Hàn Quốc, đồng thời nhấn mạnh vai trò của quá trình chuẩn hóa và xử lý số liệu đầu vào.

Đối với các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của bão nhiệt đới, mô phỏng Monte Carlo là một cách tiếp cận khác được sử dụng rộng rãi [11 - 13]. Phương pháp này xây dựng số lượng lớn các sự kiện bão tổng hợp từ các đặc trưng thống kê của bão lịch sử, sau đó tính toán trường gió tại vị trí nghiên cứu để xác định phân bố vận tốc cực trị và quan hệ với chu kỳ lặp. Trong nghiên cứu cầu Indian River Inlet tại Hoa Kỳ, mô phỏng tương đương 100.000 năm đã được sử dụng để đánh giá khí hậu gió do bão tại vị trí cầu [13].

Các nghiên cứu gần đây tiếp tục phát triển cả mô hình mô phỏng quỹ đạo bão và các phương pháp phân tích cực trị có xét đến tính không dừng của khí hậu [14, 15]. Trong nghiên cứu này, hai phương pháp Gumbel và Monte Carlo được xem xét như hai cách tiếp cận chính để xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn; cơ sở lý thuyết, phạm vi áp dụng và các ưu, nhược điểm của từng phương pháp sẽ được trình bày chi tiết ở các phần tiếp theo.

Trên cơ sở các phương pháp đã được nghiên cứu, bài báo này đề xuất một quy trình tích hợp giữa phân tích cực trị từ số liệu quan trắc và mô phỏng bão Monte Carlo nhằm xác định vận tốc gió thiết kế theo vị trí (site-specific) cho cầu nhịp lớn trong điều kiện Việt Nam. Quy trình đề xuất xem xét đồng thời các yếu tố ảnh hưởng quan trọng trong thực hành thiết kế, bao gồm chuẩn hóa số liệu khí tượng, lựa chọn chu kỳ lặp, đánh giá ảnh hưởng của bão nhiệt đới và quy đổi vận tốc gió về điều kiện sử dụng trong các bài toán thiết kế chịu gió.

Từ các phân tích trên cho thấy, đối với cầu nhịp lớn ở Việt Nam, đặc biệt tại khu vực ven biển, cửa sông và vùng chịu ảnh hưởng của bão nhiệt đới, vận tốc gió thiết kế cần được xác định trên cơ sở kết hợp giữa yêu cầu của tiêu chuẩn và đánh giá khí hậu gió tại vị trí công trình. Quy trình xác định cần bao gồm thu thập và chuẩn hóa số liệu, lựa chọn mô hình xác suất, xác định vận tốc theo chu kỳ lặp và quy đổi về điều kiện sử dụng trong thiết kế.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung vào: (i) tổng hợp các quy định và cơ sở xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn trong điều kiện Việt Nam; (ii) trình bày và so sánh hai phương pháp Gumbel và mô phỏng bão Monte Carlo; (iii) minh họa quy trình xác định vận tốc gió theo chu kỳ lặp bằng phương pháp Gumbel từ chuỗi cực đại năm; và (iv) đề xuất trình tự xác định, lựa chọn vận tốc gió thiết kế theo vị trí phục vụ thiết kế chịu gió cho cầu nhịp lớn ở Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH VẬN TỐC GIÓ THIẾT KẾ

2.1. Dữ liệu đầu vào và chuẩn hóa số liệu gió

Độ tin cậy của vận tốc gió thiết kế phụ thuộc trước hết vào chất lượng và tính đại diện của số liệu khí tượng. Đối với một vị trí cầu cụ thể, dữ liệu nên được thu thập từ các trạm có thời gian quan trắc đủ dài và có điều kiện địa lý, địa hình phù hợp với khu vực xây dựng. Khi sử dụng nhiều trạm, cần kiểm tra sự khác biệt về vị trí, cao độ, loại thiết bị, thời gian lấy trung bình và điều kiện bề mặt xung quanh trước khi kết hợp hoặc so sánh số liệu.

Chuỗi số liệu dài hạn có thể chịu ảnh hưởng bởi việc di chuyển trạm, thay đổi cao độ máy đo, thay đổi thiết bị hoặc sự phát triển của đô thị và thảm phủ xung quanh. Vì vậy, trước khi phân tích cực trị cần kiểm tra tính liên tục, tính đồng nhất và hiệu chỉnh các giá trị quan trắc về cùng điều kiện tham chiếu. Nghiên cứu của Cho [9] cho thấy sự thay đổi cao độ máy đo và độ nhám bề mặt có thể ảnh hưởng đáng kể đến vận tốc theo chu kỳ lặp; do đó, bước chuẩn hóa dữ liệu cần được thực hiện trước khi lựa chọn mô hình xác suất.

Một yêu cầu quan trọng là quy đổi vận tốc về cùng cao độ và điều kiện địa hình. Trong lớp biên khí quyển, phân bố vận tốc trung bình theo cao độ có thể được mô tả bằng quy luật lũy thừa hoặc quy luật logarithm. Việc lựa chọn quan hệ quy đổi phải phù hợp với tiêu chuẩn hoặc mô hình khí hậu gió đang sử dụng.

$$\frac{V_z}{V_{z_r}} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

trong đó V_z là vận tốc gió tại cao độ z; V_{zr} là vận tốc tại cao độ tham chiếu z_r; và α là hệ số phụ thuộc độ nhám bề mặt.

$$V_z = \frac{u_*}{k}\ln\frac{z}{z_0} \quad (2)$$

trong đó u_* là vận tốc ma sát; k là hằng số von Kármán; z_0 là chiều dài nhám khí động.

Bên cạnh cao độ và độ nhám, thời gian lấy trung bình phải được thống nhất. Vận tốc gió giật 3 giây, vận tốc trung bình 10 phút và vận tốc trung bình giờ là các đại lượng khác nhau; do đó, khi sử dụng kết quả từ nhiều nguồn, cần quy đổi về cùng định nghĩa trước khi đánh giá. Như vậy, trước khi áp dụng phương pháp xác suất, chuỗi số liệu cần được đưa về một hệ tham chiếu thống nhất về thời gian lấy trung bình, cao độ, độ nhám và đơn vị vận tốc.

2.2. Phân tích giá trị cực trị theo phân bố Gumbel

Phân bố cực trị loại I, hay phân bố Gumbel, là một trong những mô hình được sử dụng phổ biến để xác định vận tốc gió tương ứng với các chu kỳ lặp khác nhau [7, 8, 15]. Phương pháp thường sử dụng chuỗi cực đại năm (annual maximum series), trong đó mỗi năm lấy một giá trị vận tốc lớn nhất. Hàm phân bố tích lũy Gumbel được biểu diễn như sau:

$$F_V = e\exp\left[-e\exp\left(-\frac{V-\mu}{\beta}\right)\right] \quad (3)$$

trong đó F_V là xác suất không vượt của vận tốc V; μ là tham số vị trí; và $\beta > 0$ là tham số tỷ lệ.

Với chuỗi gồm N giá trị cực đại năm, các giá trị được sắp xếp theo thứ tự tăng dần. Xác suất không vượt thực nghiệm có thể xác định thông qua vị trí xác suất. Trong minh họa của nghiên cứu này sử dụng quan hệ:

$$P_m = \frac{m}{N+1} \quad (4)$$

trong đó m là thứ hạng của giá trị sau khi sắp xếp. Biến rút gọn Gumbel được xác định bởi:

$y_m = -\ln[-\ln(P_m)]$ (5)

Từ hàm phân bố Gumbel, quan hệ giữa vận tốc và biến rút gọn có dạng tuyến tính:

$V = \mu + \beta y$ (6)

Do đó, μ và β có thể được xác định bằng hồi quy tuyến tính giữa V và y. Ngoài phương pháp bình phương tối thiểu (RMS), các tham số còn có thể được ước lượng bằng phương pháp moment hoặc hợp lý cực đại. Với phương pháp moment, $\beta = (\sqrt{6}/\pi)s$ và $\mu = \overline{V} - \gamma\beta$, trong đó $\overline{V}$ và s là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của chuỗi, còn $\gamma = 0{,}5772$ là hằng số Euler. Cho [9] đã so sánh phương pháp moment và bình phương tối thiểu, đồng thời sử dụng sai số RMS để đánh giá độ phù hợp của phân bố.

Đối với chu kỳ lặp T, xác suất không vượt và biến rút gọn tương ứng được xác định như sau:

$$F_{V_T} = 1 - \frac{1}{T} \quad (7)$$

$$y_T = -\ln\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right] \quad (8)$$

$V_T = \mu + \beta y_T$ (9)

Phương trình (9) cho phép xác định các vận tốc V_{50}, V_{100}, V_{200} hoặc các chu kỳ khác theo yêu cầu thiết kế. Ưu điểm của phương pháp là quy trình tương đối đơn giản, dễ kiểm chứng và sử dụng trực tiếp số liệu quan trắc. Tuy nhiên, khi T lớn hơn nhiều so với chiều dài chuỗi N, bất định ngoại suy tăng lên; vì vậy cần đánh giá thận trọng khi áp dụng cho các công trình có mức độ quan trọng cao.

2.3. Mô phỏng bão Monte Carlo

Đối với các khu vực mà vận tốc gió cực trị chịu ảnh hưởng đáng kể của bão nhiệt đới, chuỗi số liệu quan trắc tại một trạm khí tượng đơn lẻ có thể không bao quát đầy đủ các sự kiện gió cực đoan có chu kỳ lặp dài. Trong trường hợp này, phương pháp mô phỏng bão Monte Carlo được sử dụng nhằm mô hình hóa quá trình hình thành, di chuyển và phát triển trường gió của các cơn bão, từ đó xác định phân bố vận tốc cực trị tại vị trí công trình dựa trên một số lượng lớn các sự kiện bão mô phỏng [10 - 13].

Khác với phương pháp phân tích cực trị dựa trực tiếp trên chuỗi vận tốc quan trắc, Monte Carlo xây dựng các sự kiện bão tổng hợp từ các đặc trưng thống kê của bão lịch sử. Một sự kiện bão được biểu diễn bởi tập hợp các biến ngẫu nhiên đặc trưng cho cường độ, quy mô và quỹ đạo của bão:

$X = \{\Delta P, R_{max}, V_t, \theta, d, \ldots\}$ (10)

trong đó: ΔP - độ hụt áp suất tâm bão, đại diện cho cường độ của bão; R_{max} - bán kính gió cực đại, đặc trưng cho quy mô vùng gió mạnh xung quanh tâm bão; V_t - vận tốc tịnh tiến của bão, mô tả tốc độ di chuyển của tâm bão; θ - hướng di chuyển hoặc góc quỹ đạo của bão so với hệ tọa độ tham chiếu; d - khoảng cách tiếp cận nhỏ nhất giữa tâm bão và vị trí công trình;

Quy trình mô phỏng Monte Carlo thường bao gồm năm bước chính. Đầu tiên, cơ sở dữ liệu bão lịch sử trong phạm vi ảnh hưởng của công trình được xây dựng nhằm xác định các đặc trưng thống kê của khí hậu bão. Tiếp theo, các hàm phân bố xác suất của từng tham số bão và mối tương quan giữa chúng được thiết lập. Dựa trên các mô hình xác suất này, một số lượng lớn các sự kiện bão tổng hợp được tạo ra bằng kỹ thuật lấy mẫu ngẫu nhiên Monte Carlo. Đối với mỗi sự kiện bão, mô hình trường gió được sử dụng để xác định sự biến thiên của vận tốc và hướng gió tại vị trí công trình; các giá trị này tiếp tục được hiệu chỉnh theo cao độ, điều kiện địa hình và thời gian lấy trung bình phù hợp với yêu cầu thiết kế. Cuối cùng, các giá trị vận tốc cực đại từ chuỗi mô phỏng được xử lý tương tự chuỗi quan trắc thực tế để xây dựng quan hệ giữa vận tốc gió và chu kỳ lặp.

Ưu điểm quan trọng của phương pháp Monte Carlo là khả năng mở rộng chiều dài chuỗi khí hậu thông qua việc tạo ra số lượng lớn các sự kiện bão giả lập, qua đó giảm sự phụ thuộc trực tiếp vào thời đoạn quan trắc thực tế. Phương pháp này đồng thời cho phép xác định vận tốc cực trị theo hướng:

$V_T = V_{T(\theta)}$ (11)

trong đó VT(θ) là vận tốc gió ứng với chu kỳ lặp T theo hướng gió θ. Đây là một ưu điểm quan trọng đối với cầu nhịp lớn, bởi các hiện tượng khí động như buffeting, flutter và dao động do xoáy phụ thuộc đáng kể vào hướng gió tương đối giữa dòng khí và kết cấu cầu.

Mặc dù có khả năng mô phỏng các sự kiện hiếm với chu kỳ lặp dài, Monte Carlo không loại bỏ hoàn toàn các nguồn bất định trong quá trình xác định vận tốc thiết kế. Kết quả phụ thuộc vào độ tin cậy của cơ sở dữ liệu bão lịch sử, mô hình xác suất của các tham số bão, mô hình quỹ đạo, mô hình cường độ và mô hình trường gió. Vì vậy, trước khi áp dụng cho thiết kế công trình, các mô hình thành phần cần được hiệu chỉnh và kiểm chứng thông qua việc so sánh với các sự kiện bão quan trắc trong khu vực nghiên cứu.

2.4. So sánh hai phương pháp

Hai phương pháp đều nhằm xác định vận tốc gió ứng với một xác suất vượt hoặc chu kỳ lặp nhất định, nhưng khác nhau cơ bản về cách mô hình hóa. Phân tích Gumbel xem vận tốc cực đại quan trắc là biến ngẫu nhiên và xây dựng trực tiếp phân bố xác suất của biến này. Ngược lại, Monte Carlo mô hình hóa các yếu tố tạo ra vận tốc cực trị - gồm cường độ, quỹ đạo và đặc trưng của bão - trước khi xác định phân bố vận tốc tại vị trí công trình.

Đối với Gumbel, nguồn bất định chủ yếu liên quan đến lấy mẫu, chiều dài chuỗi, lựa chọn phân bố và ước lượng tham số. Khi chuỗi quan trắc chỉ dài vài chục năm nhưng cần xác định vận tốc có chu kỳ lặp vài trăm năm, kết quả phụ thuộc đáng kể vào phần ngoại suy của hàm phân bố. Monte Carlo giảm sự phụ thuộc trực tiếp vào chiều dài chuỗi tại một trạm bằng cách tạo nhiều sự kiện tổng hợp, nhưng đồng thời đưa thêm bất định từ mô hình bão và trường gió.

Sự khác biệt quan trọng khác nằm ở khả năng mô tả cơ chế và hướng của sự kiện cực đoan. Phân tích Gumbel truyền thống thường cung cấp một giá trị vận tốc tương ứng với chu kỳ lặp mà chưa thể hiện trực tiếp sự phụ thuộc theo hướng gió, trừ khi chuỗi số liệu được phân chia và phân tích riêng theo từng nhóm hướng gió. Monte Carlo mô phỏng trực tiếp cơ chế bão nhiệt đới và có thể xác định đồng thời cường độ, hướng tiếp cận và các đặc trưng vật lý của bão. Điều này đặc biệt hữu ích đối với cầu nhịp lớn ven biển hoặc cửa sông.

Mặt khác, Gumbel có ưu thế về tính đơn giản và khả năng kiểm chứng. Quan hệ giữa vận tốc và biến rút gọn có thể được đánh giá trực tiếp trên đồ thị xác suất hoặc bằng các chỉ tiêu độ phù hợp. Monte Carlo yêu cầu kiểm chứng nhiều lớp mô hình, từ tần suất bão, quỹ đạo và cường độ đến mô hình trường gió. Do đó, hai phương pháp nên được xem là bổ sung cho nhau thay vì lựa chọn loại trừ. Tóm tắt các tiêu chí so sánh giữa hai phương pháp được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh phương pháp Gumbel và mô phỏng bão Monte Carlo

Tiêu chí	Phân tích Gumbel	Mô phỏng bão Monte Carlo
Đối tượng mô hình	Vận tốc gió cực đại	Sự kiện bão và trường gió
Dữ liệu chính	Chuỗi cực đại năm	Cơ sở dữ liệu bão lịch sử
Cơ sở phương pháp	Thống kê cực trị	Xác suất kết hợp mô hình vật lý
Chiều dài dữ liệu	Ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả	Dùng để hiệu chỉnh mô hình bão
Chu kỳ lặp dài	Phụ thuộc mạnh vào ngoại suy	Có thể tạo chuỗi mô phỏng rất dài
Sự kiện bão hiếm	Có thể thiếu trong chuỗi quan trắc	Có thể sinh tổng hợp
Hướng gió	Cần phân tích riêng theo từng vùng hướng gió	Có thể xác định trực tiếp
Đặc trưng vật lý của bão	Không xét trực tiếp	Có xét
Mức độ kiểm chứng	Tương đối đơn giản	Phức tạp hơn
Khối lượng tính toán	Thấp	Cao
Nguồn bất định chính	Lấy mẫu, tham số, ngoại suy	Mô hình bão và trường gió
Phạm vi phù hợp	Chuỗi quan trắc đủ dài, đồng nhất	Khu vực chịu ảnh hưởng đáng kể của bão nhiệt đới

3. MINH HỌA XÁC ĐỊNH VẬN TỐC GIÓ BẰNG PHƯƠNG PHÁP GUMBEL

Bước 1. Tổng hợp chuỗi số liệu

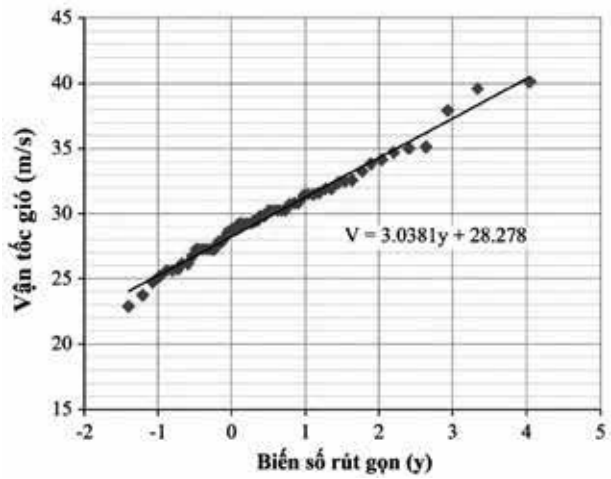
Để minh họa quy trình tính toán, sử dụng chuỗi gồm 56 giá trị (N = 56) vận tốc gió cực đại năm trong giai đoạn 1956 - 2011 (Hình 1). Mục đích của phần này là trình bày từng bước từ sắp xếp số liệu, xác định xác suất không vượt và biến rút gọn đến xây dựng quan hệ vận tốc - chu kỳ lặp. Khi áp dụng cho một dự án cụ thể, chuỗi số liệu cần được kiểm tra tính đồng nhất và chuẩn hóa theo các yêu cầu nêu tại mục 2.1.



Hình 1. Số liệu vận tốc gió cực đại theo năm

Bước 2. Sắp xếp chuỗi số liệu theo thứ tự tăng dần từ nhỏ nhất đến lớn nhất, xác suất không vượt được xác định theo phương trình (4), sau đó chuyển sang biến rút gọn theo phương trình (5).

Bước 3. Vẽ đồ thị quan hệ giữa vận tốc gió và biến rút gọn (Hình 2)



Hình 2. Đồ thị quan hệ giữa vận tốc gió và biến rút gọn

Hồi quy tuyến tính giữa vận tốc gió và biến rút gọn thu được: V = 28,278 + 3,0381y, với hệ số xác định R^2 = 0,9852. Giá trị R^2 cao cho thấy quan hệ tuyến tính giữa vận tốc quan trắc và biến rút gọn Gumbel phù hợp tốt với chuỗi số liệu đang xét. Tuy nhiên, trong ứng dụng thiết kế nên kết hợp thêm các chỉ tiêu độ phù hợp và khoảng tin cậy để đánh giá bất định của mô hình, đặc biệt khi ngoại suy tới chu kỳ lặp lớn.

Bảng 2. Sắp xếp chuỗi dữ liệu

Trật tự (m)	Năm	V (m/s)	Biến rút gọn (y)	Trật tự (m)	Năm	V (m/s)	Biến rút gọn (y)
1	1996	22.8	-1.397	29	1967	29.8	0.39192
2	1970	23.7	-1.2089	30	2009	29.8	0.44339
3	2001	24.7	-1.0799	31	1959	30.3	0.49583
4	1968	25.2	-0.9771	32	1961	30.3	0.54937
5	1960	25.6	-0.8894	33	1989	30.3	0.60414
6	2008	25.6	-0.8115	34	1991	30.3	0.66031
7	2000	25.7	-0.7406	35	2011	30.3	0.71805
8	1974	26.2	-0.6748	36	1969	30.7	0.77755
9	1999	26.2	-0.6129	37	1975	30.9	0.83902
10	2010	26.7	-0.5542	38	1987	30.9	0.90272
11	1965	27.3	-0.4978	39	1956	31.4	0.96893
12	1977	27.3	-0.4435	40	1988	31.5	1.03797
13	1981	27.3	-0.3908	41	1998	31.5	1.11024
14	1990	27.3	-0.3393	42	1958	31.6	1.18619
15	1995	27.3	-0.2889	43	1966	31.9	1.26638
16	2003	27.3	-0.2394	44	1994	31.9	1.35146
17	1986	27.8	-0.1905	45	1972	32.4	1.44228
18	2007	27.8	-0.1421	46	1957	32.5	1.53987
19	2005	28.3	-0.094	47	1979	32.6	1.64556
20	1971	28.6	-0.0462	48	2004	33.3	1.76113
21	1993	28.8	0.00147	49	1982	33.8	1.88895
22	1997	28.8	0.04918	50	1976	34.2	2.03234
23	1962	29.3	0.097	51	1992	34.7	2.19619
24	1980	29.3	0.14503	52	1963	35.1	2.38806
25	1984	29.3	0.19337	53	1983	35.2	2.6206
26	2006	29.3	0.24213	54	1964	37.9	2.91753
27	1985	29.4	0.2914	55	1978	39.6	3.3321
28	1973	29.5	0.3413	56	2002	40.2	4.03421

Bước 4. Vận tốc gió theo chu kỳ lặp

Từ phương trình (6): $V = \mu + \beta y = 28,278 + 3,0381y$. Trong đó $\mu = 28,278$ và $\beta = 3,0381$. Từ phương trình (8), vận tốc gió theo chu kỳ lặp T được xác định như sau: $V_T = 28,278 + 3,0381\{-\ln[-\ln(1 - 1/T)]\}$, kết quả được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Vận tốc gió ứng với chu kỳ lặp lại

T (năm)	V_T (m/s)
10	35,11
20	37,30
30	38,56
50	40,13
100	42,25
200	44,37
300	45,60
500	47,16

Kết quả cho thấy vận tốc tăng từ 40,13 m/s tại chu kỳ 50 năm lên 42,25 m/s tại 100 năm, 44,37 m/s tại 200 năm và 47,16 m/s tại 500 năm. Khi chu kỳ lặp tăng xa so với chiều dài 56 năm của chuỗi quan trắc, kết quả phụ thuộc ngày càng nhiều vào giả thiết phân bố Gumbel. Do đó, các giá trị chu kỳ lớn cần được xem xét cùng với bất định của mô hình và tại khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của bão, có thể được kiểm tra bổ sung bằng mô phỏng Monte Carlo.

4. ĐỀ XUẤT QUY TRÌNH XÁC ĐỊNH VẬN TỐC GIÓ THIẾT KẾ CHO CẦU NHỊP LỚN Ở VIỆT NAM

Đối với các cầu nhịp lớn, đặc biệt là cầu dây văng và cầu treo dây võng, việc xác định vận tốc gió thiết kế cần xem xét đồng thời các yêu cầu của tiêu chuẩn hiện hành và đặc điểm khí hậu gió tại vị trí xây dựng. Trên cơ sở phân tích các phương pháp xác suất và đặc điểm ảnh hưởng của bão nhiệt đới, bài báo đề xuất quy trình xác định vận tốc gió thiết kế gồm các bước chính như Hình 3.

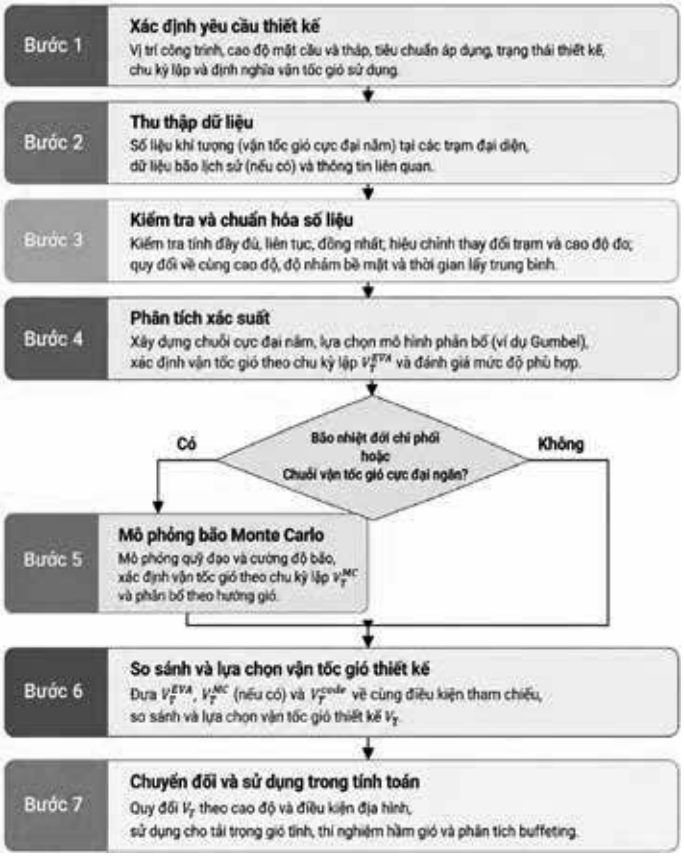
Quy trình đề xuất không xem phân tích cực trị Gumbel và mô phỏng bão Monte Carlo là hai phương pháp thay thế nhau. Phân tích cực trị cung cấp cơ sở xác suất trực tiếp từ số liệu quan trắc, trong khi mô phỏng Monte Carlo bổ sung khả năng đánh giá các sự kiện gió cực đoan liên quan đến bão nhiệt đới và các chu kỳ lặp dài. Việc kết hợp hai phương pháp giúp nâng cao tính minh bạch và khả năng kiểm chứng khi lựa chọn vận tốc gió thiết kế cho các công trình cầu nhịp lớn tại Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tổng hợp và phân tích các phương pháp xác định vận tốc gió thiết kế phục vụ thiết kế chịu gió cho các công trình cầu nhịp lớn, trong đó tập trung vào hai cách tiếp cận chính gồm phân tích giá trị cực trị theo phân bố Gumbel và mô phỏng bão Monte Carlo. Các kết quả chính có thể rút ra như sau:

(1) Việc xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn cần được thực hiện theo điều kiện khí hậu tại vị trí công trình, thay vì chỉ sử dụng trực tiếp các giá trị phân vùng gió chung. Đặc biệt đối với cầu dây văng và cầu treo dây võng tại khu vực ven biển, cửa sông hoặc chịu ảnh hưởng của bão nhiệt đới, các yếu tố về chu kỳ lặp, cao độ, độ nhám bề mặt và thời gian lấy trung bình cần được xem xét thống nhất.

(2) Phương pháp phân tích cực trị Gumbel có ưu điểm về tính đơn giản, minh bạch và khả năng áp dụng trực tiếp với chuỗi số liệu quan trắc. Kết quả minh họa với chuỗi 56 năm vận tốc gió cực đại năm cho thấy mối quan hệ tuyến tính giữa vận tốc gió và biến rút gọn Gumbel với hệ số xác định cao. Tuy nhiên, khi xác định vận tốc cho các chu kỳ lặp lớn hơn nhiều so với chiều dài chuỗi quan trắc, độ bất định do quá trình ngoại suy cần được đánh giá thận trọng.



Hình 3. Quy trình đề xuất xác định vận tốc gió thiết kế cho cầu nhịp lớn ở Việt Nam

(3) Mô phỏng bão Monte Carlo là phương pháp bổ sung hiệu quả đối với các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của bão nhiệt đới, cho phép xem xét trực tiếp các đặc trưng vật lý của bão như cường độ, quỹ đạo, hướng tiếp cận và trường gió. Phương pháp này có khả năng đánh giá các sự kiện cực đoan với chu kỳ lặp dài và xác định sự phụ thuộc của vận tốc gió theo hướng, tuy nhiên kết quả phụ thuộc vào độ tin cậy của mô hình bão và mô hình trường gió.

(4) Hai phương pháp Gumbel và Monte Carlo không nên được xem là các phương pháp thay thế mà có thể sử dụng bổ sung cho nhau. Phân tích Gumbel cung cấp cơ sở thống kê từ số liệu quan trắc thực tế, trong khi Monte Carlo hỗ trợ đánh giá các sự kiện hiếm do bão nhiệt đới và giảm sự phụ thuộc vào chiều dài chuỗi quan trắc.

(5) Trên cơ sở các phân tích trên, bài báo đề xuất quy trình xác định vận tốc gió thiết kế theo vị trí (site-specific) cho cầu nhịp lớn ở Việt Nam, bao gồm các bước: thu thập và chuẩn hóa dữ liệu, phân tích cực trị, đánh giá ảnh hưởng của bão nhiệt đới, so sánh với giá trị theo tiêu chuẩn và lựa chọn vận tốc sử dụng trong tính toán tải trọng gió, thí nghiệm hầm gió và phân tích buffeting. Quy trình đề xuất là cơ sở tham khảo nhằm nâng cao tính nhất quán và khả năng kiểm chứng trong thiết kế chịu gió cho các công trình cầu đặc biệt tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] E. Simiu, R. H. Scanlan. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.

[2] H. Sato. Wind-resistant design manual for highway bridges in Japan. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. vol. 91, no. 12-15, pp. 1499-1509, 2003, doi: 10.1016/j.jweia.2003.09.012.

[3] Japan Road Association. Wind Resistant Design Manual for Highway Bridges. Japan Road Association, Tokyo, Japan, 2007.

[4] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T 3360-01-2018, Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges, Beijing, China, 2018.

[5] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 11823-3:2017. Thiết kế cầu đường bộ - Phần 3: Tải trọng và hệ số tải trọng, Hà Nội, 2017.

[6] Bộ Xây dựng. QCVN 02:2022/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, Hà Nội, 2022.

[7] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 2737:2023 - Tải trọng và tác động, Hà Nội, 2023.

[8] E. J. Gumbel. Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, 1958.

[9] E. Simiu, J. Bietry, J. J. Filliben. Sampling errors in the estimation of extreme wind. Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 104, pp. 491-501, 1978.

[10] D. Cho. Design wind speed estimation for long span bridges in Korean southern and western coasts. International Journal of Engineering and Technology Innovation, vol. 10, no. 2, pp. 146-155, 2020, doi: 10.46604/ijeti.2020.3545.

[11] M. E. Batts, L. R. Russell, E. Simiu. Hurricane wind speeds in the United States. Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 106, no. 10, pp. 2001-2016, 1980.

[12] P. N. Georgiou, A. G. Davenport, B. J. Vickery. Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 13, pp. 139-152, 1983.

[13] J. P. C. King, J. Galsworthy, P. J. Vickery, M. Mikitiuk, L. Kong, A Study of Wind Effects for Indian River Inlet Bridge, Delaware, USA, Report BLWT-SS31-2004, Alan G. Davenport Wind Engineering Group, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 2005.

[14] M. Huang, Q. Wang, Q. Li, R. Jing, N. Lin, L. Wang. Typhoon wind hazard estimation by full-track simulation with various wind intensity models. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. vol. 218, 104792, 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104792.

[15] J. Li, D. Zhu, L. Cao, C. Li. A wavelet transform based stationary transformation method for estimating the extreme value of the non-stationary wind speeds. Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 74, 103549, 2023, doi: 10.1016/j.probengmech.2023.103549.

■Ngày nhận bài 30/7/2026 ■Ngày sửa bài: 06/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/8/2026

Nghiên cứu đánh giá tải trọng giới hạn của cọc căn cứ hàm số quan hệ tải trọng - Độ lún theo các tiêu chí khác nhau

Study on evaluating the ultimate capacity of pile based on load - Settlement relationship function according to different criteria

> PGS.TS BÙI TRƯỜNG SƠN[1], THS LÊ TIẾN NGHĨA[2,*]
[1]Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP.HCM
Email: buitruongson@hcmut.edu.vn
[2]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
[*]Tác giả liên hệ, Email: letiennghia@mtu.edu.vn

TÓM TẮT

Căn cứ cơ sở các hàm số xấp xỉ mô tả quan hệ tải trọng - độ lún của cọc từ kết quả thí nghiệm nén tĩnh, nghiên cứu đề nghị các tiêu chí đánh giá tải trọng giới hạn. Tải trọng giới hạn theo các hàm số $1/Q = a + b/S$, $Q = aS^b$ và $Q = a + b/S$ phù hợp với kết quả thí nghiệm thực tế, đặc biệt khi sử dụng tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen. Tải trọng giới hạn tương ứng với độ lún 10%d cho giá trị lớn nên không phù hợp đối với cọc khoan nhồi có kích thước lớn. Tải trọng giới hạn theo tiêu chí tiệm cận có giá trị ổn định và có triển vọng sử dụng với điều kiện xem xét khống chế với tỷ lệ thích hợp. Kết quả nghiên cứu giúp bổ sung các phương pháp phân tích đánh giá kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc và có khả năng mở rộng nghiên cứu phát triển về khuynh hướng này trong thí nghiệm.

Từ khóa: Thí nghiệm nén tĩnh cọc; tải trọng giới hạn của cọc; quan hệ tải trọng - độ lún.

ABSTRACT

Based on the approximate functions describing the load-settlement relationship of the pile obtained from static load test results, this study proposes criteria for evaluating ultimate load capacity. The critical loads according to the functions $1/Q = a + b/S$, $Q = aS^b$ and $Q = a + b/S$ are consistent with actual experimental results, particularly when applying Brinch Hansen's 90% criterion. The critical load corresponding to the settlement of 10%d yields excessively large values, making it unsuitable for large-diameter bored piles. Meanwhile, the critical load based on the asymptotic criterion demonstrates stable values and shows promising application potential, provided it is governed by an appropriate reduction ratio. The research results help supplement analytical methods to evaluate static pile load test results and offer potential for further expanding research trends in this field.

Keywords: Static loading test of pile; critical load of pile; load - settlement relationship.

1. MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ TẢI TRỌNG GIỚI HẠN TỪ KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM NÉN TĨNH CỌC

Sức chịu tải giới hạn (tải trọng giới hạn) R_u của cọc theo TCVN 10304:2025 được xác định tương ứng với độ lún $s = \zeta.s_{u,mt}$. Trong đó, $s_{u,mt}$ - trị số lún giới hạn trung bình cho trong tiêu chuẩn thiết kế nền móng xác định theo nhiệm vụ thiết kế hoặc lấy theo tiêu chuẩn đối với nhà và công trình; ζ - hệ số chuyển từ độ lún trung bình của móng sang độ lún ổn định của cọc khi thí nghiệm. Giá trị ζ được lấy từ 0,2 đến 0,35 khi độ lún s nhỏ và độ lún s để xác định R_u trong trường hợp này được lấy lớn nhất là 40 mm.

TCVN 9393:2012 cho phép xác định sức chịu tải giới hạn ứng với chuyển vị giới hạn theo các đề nghị khác nhau như: bằng 10%d (d - đường kính cọc) hay ½ độ lún giới hạn.

Khi kết quả thí nghiệm chưa đạt đến phá hoại, đặc biệt đối với cọc có kích thước lớn, cần thiết sử dụng các phương pháp khác để đánh giá tải trọng giới hạn. Theo hướng dẫn kỹ thuật nền móng Canada (Canadian Foundation Engineering Manual - 1985), giá trị tải trọng giới hạn ứng với độ lún phá hoại S_f phụ thuộc biến dạng đàn hồi của cọc δ và tỷ số d/30. Phương pháp Offset Limit (phương pháp Davisson) chấp nhận tải trọng giới hạn là tải trọng ứng với độ lún trên đường cong tải trọng - độ lún có được từ kết quả nén tĩnh cọc:

$$S_f = \frac{QL_p}{E_p A} + 0,0038 + \frac{d}{120}(m)$$

Phương pháp Chin - Kondner dựa trên các kết quả thực nghiệm nghiên cứu và từ các thí nghiệm được thực hiện với các mô hình

cọc cả ở ngoài hiện trường và trong phòng thí nghiệm. Phương pháp Chin - Kondner là phương pháp phức tạp trong tiếp cận và xác định khả năng chịu tải cọc. Roscoe, Dic, Mice (1984) và Vesic đã ghi nhận rằng ma sát thành cọc được huy động khi chuyển vị nhỏ (6 - 10 mm) và sức kháng mũi khi đó không được huy động toàn bộ cho đến khi chuyển vị đầu cọc lớn và đạt đến 30% đường kính cọc. Theo đó, Chin đã đi đến phương pháp tách thành phần ma sát thành và sức kháng mũi ra từ số liệu thí nghiệm. Phương pháp của Chin giả thiết rằng mối tương quan giữa tải trọng tác dụng (Q) và độ lún (S) có dạng hyperbol (Roscoe, 1984). Do đó, độ lún do tải trọng tác dụng có thể được biểu diễn theo trục ngang và trục đứng là tỷ số giữa độ lún và tải trọng thể hiện các điểm cho phép xác định các đường thẳng được chia ra bởi hai phần riêng biệt: phần đầu có quan hệ với ma sát bề mặt bên và phần thứ hai là quan hệ sức chịu tải giới hạn. Nghịch đảo của độ dốc phần thứ hai cho phép xác định sức chịu tải giới hạn của cọc. Quan hệ (S/Q) - S thừa nhận đường tải trọng - độ lún gần đúng có dạng hyperbol.

Tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen thừa nhận giá trị tải trọng giới hạn dưới dạng: $Q_u = \frac{1}{2\sqrt{C_1 C_2}}$. Ở đây: C_1 – độ dốc của đường thẳng từ biểu đồ quan hệ $\sqrt{S}/Q$ và S; C_2 – giao điểm của trục tung và đường thẳng từ biểu đồ quan hệ $\sqrt{S}/Q$ và S.

Thật vậy, nếu xem quan hệ $\sqrt{S}/Q$ và S có dạng đường thẳng, phương trình đường thẳng có thể viết dưới dạng:

$$\frac{\sqrt{S}}{Q} = C_1 S + C_2$$

Chia hai vế cho $\sqrt{S}$:

$$\frac{1}{Q} = C_1\sqrt{S} + \frac{C_2}{\sqrt{S}}$$

Căn cứ bất đẳng thức Cauchy:

$$\frac{1}{Q} = C_1\sqrt{S} + \frac{C_2}{\sqrt{S}} \geq 2\sqrt{C_1\sqrt{S}\frac{C_2}{\sqrt{S}}} = 2\sqrt{C_1 C_2}$$

Từ đó, có thể rút ra:

$$\frac{1}{Q} \geq 2\sqrt{C_1 C_2}$$

Hay:

$$Q_u = \frac{1}{2\sqrt{C_1 C_2}}$$

Brinch Hansen (1963) đề nghị tiêu chuẩn 90% xác định tải trọng giới hạn của cọc và sau đó được chấp nhận sử dụng rộng rãi từ năm 1970 ở Thụy Điển và các nước Scandinavia. Ở đây, đường cong quan hệ tải trọng - độ lún bắt đầu bằng hai lần độ lún của đầu cọc chịu 90% tải trọng giới hạn ($S_{90\%}$), ở vị trí $0{,}9Q_u/0{,}5\delta_u$ trên đường cong. Khi đó, độ lún giới hạn $S_u = 2S_{90\%}$.

Phương pháp Mazurkiewicz (1972) thừa nhận quan hệ tải trọng - chuyển vị gần đúng có dạng parabol và chi tiết xác định tải trọng căn cứ vào biện pháp hình học. Shen và Niu (1991) đề xuất xác định độ cong bằng định nghĩa toán học để xây dựng biểu đồ độ cong của đường cong quan hệ tải trọng - độ lún và tải trọng tác dụng theo các bước tăng tải đủ nhỏ. Ban đầu, biểu đồ này hiển thị với một giá trị gần như không đổi, sau đó tăng cho đến khi thu được một đỉnh, tiếp theo là các đáy và đỉnh. Đỉnh đầu tiên là tải trọng giới hạn Q_u.

Từ quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc của thí nghiệm nén tĩnh cọc có thể trực tiếp hoặc gián tiếp bằng các phương pháp đồ thị đánh giá giá trị tải trọng giới hạn của cọc. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp kết quả thí nghiệm không cho phép đánh giá trực tiếp được giá trị này do tải trọng thí nghiệm chưa đạt tới giá trị giới hạn, độ lún đầu cọc có giá trị bé hay một số nguyên nhân khác. Trong trường hợp này, việc ngoại suy quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc và phân tích chọn lựa tải trọng giới hạn để đánh giá khả năng chịu tải của cọc là cần thiết, giúp các kỹ sư có cơ sở để nhận định về khả năng chịu tải của cọc đúng đắn. Ngoài ra, việc phân tích và chọn lựa các tiêu chí để đánh giá tải trọng giới hạn theo hàm số trên cơ sở áp dụng phân tích bằng dữ liệu thực tế giúp bổ sung các lựa chọn về giá trị tải trọng giới hạn trong thí nghiệm nén tĩnh cọc.

Cho đến nay, một số nhà nghiên cứu căn cứ trên cơ sở hàm số toán học tiến hành phân tích và đề nghị quan hệ giữa tải trọng và độ lún đầu cọc. Trên cơ sở đó, giá trị tải trọng giới hạn được đề nghị xác định theo một số tiêu chí khác nhau.

2. NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ GIÁ TRỊ TẢI TRỌNG GIỚI HẠN CĂN CỨ HÀM SỐ QUAN HỆ TẢI TRỌNG - ĐỘ LÚN THEO CÁC TIÊU CHÍ KHÁC NHAU

Để đánh giá tải trọng giới hạn trên cơ sở quan hệ tải trọng - độ lún theo các dạng hàm số, 3 tiêu chí được đề nghị chọn lựa sử dụng phân tích: căn cứ độ lún giới hạn $S_u = 10\%d$, tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen và phương pháp tiệm cận.

Xem các hàm số quan hệ tải trọng Q - độ lún S nhận các dạng như sau [8]:

(i) Hàm dạng phân thức hệ số mẫu:

$1/Q = a + b/S$ (1)

Với: $a = \frac{\sum Q_i' - b\sum S_i'}{n}$;

$$b = \frac{\sum Q_i' \sum S_i' - n\sum S_i' Q_i'}{\left(\sum S_i'\right)^2 - n\sum (S_i')^2}$$

Ở đây: $Q' = 1/Q$; $S' = 1/S$

(ii) Hàm số mũ:

$Q = ae^{b/S}$ (2)

Với: $a' = \ln a = \frac{\sum Q_i' - b\sum S_i'}{n}$;

$$b = \frac{\sum Q_i' \sum S_i' - n\sum S_i' Q_i'}{\left(\sum S_i'\right)^2 - n\sum (S_i')^2}$$

Ở đây: $Q' = \ln Q$; $S' = 1/S$.

(iii) Hàm dạng phân thức hệ số tử:

$Q = a + b/S$ (3)

Ở đây: $a = \frac{1}{n}\left(\sum Q_i - b\sum S_i'\right)$;

$$b = \frac{\sum Q_i \sum S_i' - n\sum Q_i S_i'}{\left(\sum S_i'\right)^2 - n\sum \left(S_i'\right)^2}$$

Với: $S' = 1/S$.

(iv) Hàm lũy thừa:

$Q = aS^b$ (4)

Ở đây: $a' = \ln a = \frac{\sum Q_i' - b\sum S_i'}{n}$;

$$b = \frac{\sum Q_i' \sum S_i' - n\sum S_i' Q_i'}{\left(\sum S_i'\right)^2 - n\sum (S_i')^2}$$

Với: $Q' = \ln Q$; $S' = \ln S$.

Lưu ý rằng các hệ số a và b được xác định bằng phương pháp hồi qui và bình phương cực tiểu, phụ thuộc vào dạng hàm số và dữ liệu thí nghiệm.

2.1. Tiêu chí căn cứ độ lún giới hạn $S_u = 10\%d$

Theo Tiêu chuẩn DTU 13 - 2 (Pháp), Tiêu chuẩn BS 8004 : 1986 (Anh), Tiêu chuẩn JSF 1811 - 1993 (Nhật) và TCVN 9393 : 2012, tải trọng giới hạn là tải trọng mà tại đó có độ lún bằng 10%d (d - đường

kính cọc). Căn cứ tiêu chuẩn này và các dạng hàm số, cơ sở đánh giá giá trị tải trọng giới hạn được tổng hợp thể hiện bằng các thuật toán chi tiết sau:

(i) Hàm dạng phân thức hệ số mẫu: 1/Q = a + b/S

Căn cứ cơ sở độ lún giới hạn S_u = 10%d, giá trị tải trọng giới hạn Q_u của cọc có thể được xác định theo biểu thức:

$$\frac{1}{Q_u} = a + \frac{b}{S_u} = a + \frac{b}{0,1d} = \frac{0,1ad + b}{0,1d}$$

Từ đó:

$$Q_u = \frac{0,1d}{0,1ad + b} = \frac{d}{ad + 10b} \quad (5)$$

(ii) Tải trọng giới hạn theo hàm số mũ $Q = ae^{b/S}$ có thể được biểu diễn:

$$Q_u = ae^{b/S_u} = ae^{b/0,1d} = ae^{10b/d} \quad (6)$$

(iii) Hàm dạng phân thức hệ số tử: Q = a + b/S nhận giá trị tải trọng giới hạn:

$$Q_u = a + \frac{b}{S_u} = a + \frac{b}{0,1d} = a + \frac{10b}{d} \quad (7)$$

(iv) Tải trọng giới hạn theo hàm lũy thừa $Q = aS^b$

$$Q_u = a(0,1d)^b = a\left(\frac{d}{10}\right)^b \quad (8)$$

2.2. Tiêu chí căn cứ tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen

Căn cứ vào lý thuyết hàm số, có thể sử dụng tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen để đánh giá giá trị tải trọng giới hạn. Theo tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen: $S_u = 2S_{90\%}$.

(i) Từ hàm số (1):

$$\frac{1}{Q} - a = \frac{b}{S}$$

Từ đó: $S = \frac{b}{\frac{1}{Q} - a}$

Ở trạng thái giới hạn: $S_u = 2S_{90\%}$:

$$S_u = \frac{b}{\frac{1}{Q_u} - a} = \frac{2b}{\frac{1}{0,9Q_u} - a}$$

Hay:

$$\frac{2}{Q_u} - 2a = \frac{10}{9Q_u} - a$$

Nhận được:

$$Q_u = \frac{8}{9a} \quad (9)$$

(ii) Từ hàm số (2):

$$\ln Q = \ln a + \frac{b}{S}$$

Biến đổi:

$$\frac{b}{S} = \ln Q - \ln a = \ln\frac{Q}{a};$$

$$S = \frac{b}{\ln\frac{Q}{a}}$$

Ở trạng thái giới hạn: $S_u = 2S_{90\%}$:

$$S_u = \frac{b}{\ln\frac{Q_u}{a}} = 2\frac{b}{\ln\frac{9Q_u}{10a}};$$

$$\rightarrow 2\ln\frac{Q_u}{a} = \ln\frac{9Q_u}{10a}$$

$$\rightarrow \left(\frac{Q_u}{a}\right)^2 = \frac{9}{10}\frac{Q_u}{a}$$

$$\rightarrow \frac{Q_u}{a} = \frac{9}{10}$$

Nhận được:

$$Q_u = \frac{9}{10}a \quad (10)$$

(iii) Từ hàm số (3):

$$Q - a = \frac{b}{S}$$

$$\rightarrow S = \frac{b}{Q - a}$$

Ở trạng thái giới hạn: $S_u = 2S_{90\%}$:

$$S_u = \frac{b}{Q_u - a} = 2\frac{b}{0,9Q_u - a}$$

$$\rightarrow Q_u - a = \frac{0,9Q_u - a}{2}$$

$$\rightarrow \frac{11}{20}Q_u = \frac{1}{2}a$$

Nhận được:

$$Q_u = \frac{10}{11}a \quad (11)$$

(iv) Từ hàm số (4):

$$\frac{Q}{a} = S^b$$

$$\rightarrow S = \left(\frac{Q}{a}\right)^{1/b}$$

Ở trạng thái giới hạn: $S_u = 2S_{90\%}$:

$$\left(\frac{Q_u}{a}\right)^{1/b} = 2\left(\frac{0,9Q_u}{a}\right)^{1/b} \quad (12)$$

Phương trình (12) có nghiệm $Q_u = 0$. Do đó, không thể sử dụng tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen để đánh giá tải trọng giới hạn bằng hàm số (4).

2.3. Tiêu chí căn cứ giá trị tiệm cận hay cực trị

Có thể thấy rằng mỗi hàm số đều có các đặc trưng toán học như cực trị và đường tiệm cận. Đây là hai đặc trưng toán học thể hiện giá trị lớn nhất mà hàm số đạt được hoặc hướng tới nên có thể căn cứ vào đặc điểm này để lựa chọn đánh giá giá trị tải trọng giới hạn của cọc.

Đường tiệm cận của hàm số y = f(x) có thể được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} \lim\limits_{x\to\infty} f(x) = const \\ \lim\limits_{x\to const} f(x) = \infty \end{cases}$$

Khi đó, f(x) = const hoặc x = const là hai tiệm cận của hàm số.

Cực trị của hàm số xảy ra khi $f'(x_0) = 0$ có nghiệm, khi đó $f(x_0)$ là cực trị của hàm số.

(i) Hàm số (1) có thể được viết lại:

$$Q = \frac{S}{aS + b}$$

Giá trị tiệm cận Q_u đạt được khi $S \rightarrow \infty$:

$$\lim_{S\to\infty} Q = \lim_{S\to\infty}\frac{S}{aS + b} = \lim_{S\to\infty}\left(\frac{1}{a} - \frac{b}{a(aS + b)}\right)$$

$$= \lim_{S\to\infty}\frac{1}{a} - \lim_{S\to\infty}\frac{b}{a(aS + b)} = \frac{1}{a} - 0 = \frac{1}{a}$$

Tiệm cận hàm số có giá trị: $\frac{1}{a}$.

Như vậy, căn cứ vào tiệm cận đứng hàm số (1) có thể đánh giá giá trị tải trọng giới hạn của cọc:

$$Q_u = \frac{1}{a} \quad (13)$$

(ii) Hàm số (2):

Giá trị tiệm cận Q_u đạt được khi $S \to \infty$:

$$\lim_{S\to\infty} Q = \lim_{S\to\infty}\left(ae^{b/S}\right) = ae^{b/\infty} = ae^0 = a$$

Tiệm cận hàm số có giá trị: *a*.

Như vậy, căn cứ vào tiệm cận đứng hàm số (2) có thể đánh giá giá trị tải trọng giới hạn của cọc:

$$Q_u = a \quad (14)$$

(iii) Hàm số (3):

Giá trị tiệm cận Q_u đạt được khi $S \to \infty$:

$$\lim_{S\to\infty} Q = \lim_{S\to\infty}\left(a + \frac{b}{S}\right) = \lim_{S\to\infty} a + \lim_{S\to\infty}\frac{b}{S} = a + 0 = a$$

Tiệm cận hàm số có giá trị: *a*.

Như vậy, căn cứ vào tiệm cận đứng hàm số (2) có thể đánh giá giá trị tải trọng giới hạn của cọc:

$$Q_u = a \quad (15)$$

(iv) Hàm số (4):

Giá trị tiệm cận Q_u đạt được khi $S \to \infty$:

$$\lim_{S\to\infty} Q = \lim_{S\to\infty} aS^b = \infty$$

Hàm số (4) không có tiệm cận.

Các hàm số trên cũng không nhận giá trị cực trị do phương trình đạo hàm không có nghiệm. Phương pháp cực trị có thể sử dụng với hàm đa thức như hàm bậc hai và một số hàm số khác.

3. NGOẠI SUY QUAN HỆ TẢI TRỌNG - ĐỘ LÚN ĐẦU CỌC VÀ ĐÁNH GIÁ TẢI TRỌNG GIỚI HẠN TỪ KẾT QUẢ NÉN TĨNH CỌC THEO PHƯƠNG PHÁP HÀM SỐ XẤP XỈ

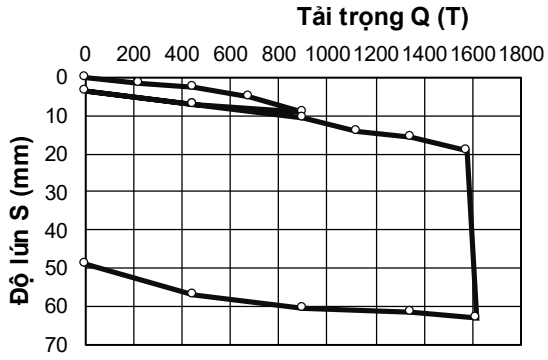
3.1. Giới thiệu dữ liệu sử dụng phân tích

Để đánh giá khả năng sử dụng hàm xấp xỉ trong phân tích đánh giá khả năng chịu tải của cọc, dữ liệu thí nghiệm nén tĩnh cọc A111 ở dự án Hà Đô Centrosa Garden (số 200 đường 3 tháng 2, TP.HCM) và cọc TP2 ở dự án Trung tâm Thương mại dịch vụ Đông Sài Gòn (lô T3-1.1, đường D2, khu Công nghệ cao, TP.HCM). Chi tiết cọc thí nghiệm được nêu ở Bảng 1, quan hệ tải trọng - độ lún từ kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc thể hiện ở Hình 1 và Hình 2.

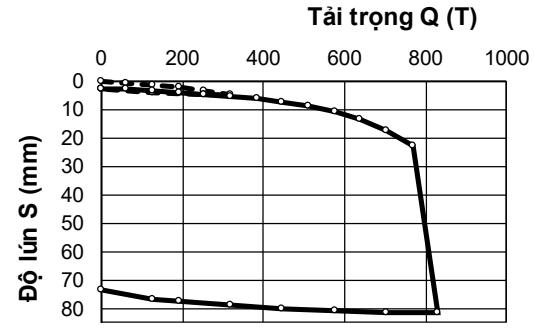
Kết quả trực tiếp ghi nhận từ đường cong quan hệ Q - S cho thấy tải trọng giới hạn của cọc A111 dao động trong khoảng 2 cấp tải cuối của chu kỳ gia tải lần 2, tức là từ 1575 T đến 1620 T, còn tải trọng giới hạn của cọc TP2 dao động trong khoảng từ 768 T đến 832 T.

Bảng 1. Thông tin cọc thí nghiệm

Tên cọc	A111	TP2
Loại cọc	Cọc khoan nhồi	Cọc khoan nhồi
Đường kính cọc, mm	1200	800
Chiều dài cọc, m	60,2	63,8
Sức chịu tải thiết kế của cọc, Tấn	900	320
Tải trọng thí nghiệm, Tấn	Tải trọng thiết kế x 200% = 1800	Tải trọng thiết kế x 300% = 960



Hình 1. Biểu đồ quan hệ tải trọng - độ lún cọc A111



Hình 2. Biểu đồ quan hệ tải trọng - độ lún cọc TP2

3.2. Phân tích quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc theo các hàm xấp xỉ và đánh giá tải trọng giới hạn theo các tiêu chí khác nhau

Nhằm phân tích tính hợp lý của các phương pháp sử dụng hàm số toán học biểu diễn quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc từ kết quả thí nghiệm nén tĩnh đến phá hoại và các tiêu chí đề nghị để dự đoán tải trọng giới hạn, sử dụng dữ liệu thí nghiệm nén tĩnh cọc A111 (dự án Hà Đô Centrosa Garden) và cọc TP2 (dự án Trung tâm thương mại dịch vụ Đông Sài Gòn). Ngoài kích thước và khả năng chịu tải khác nhau, kết quả nén tĩnh của 2 cọc cho thấy độ dốc đường cong thay đổi đột ngột ở cấp tải sau cùng nên cọc được xem là phá hoại. Trước khi phá hoại, quan hệ Q - S ở cọc A111 có dạng gần như quan hệ tuyến tính còn ở cọc TP2 quan hệ này có dạng đường cong rõ ràng hơn với độ dốc thay đổi theo mức độ gia tăng của tải trọng tác dụng. Để việc phân tích phù hợp theo các hàm số toán học, độ lún ban đầu ở chu kỳ 2 được hiệu chỉnh về gốc tọa độ.

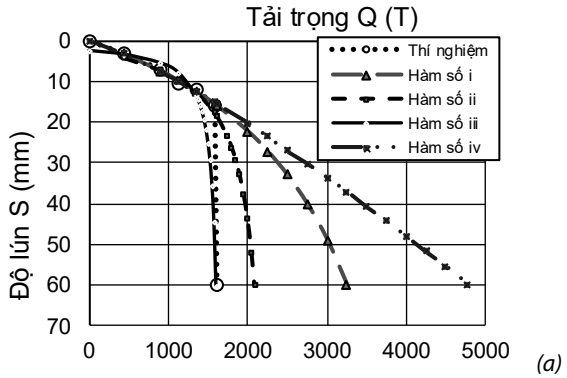
Quan hệ tải trọng - độ lún theo các hàm số (i) đến (iv) và kết quả thí nghiệm thực tế của hai cọc thể hiện ở Hình 3. Kết quả cho thấy mặc dù quan hệ Q - S của cọc A111 có dạng gần như 2 đoạn thẳng có độ dốc khác nhau nhưng hàm số (iii) mô tả khá phù hợp quan hệ này trong khi các hàm (i), (ii) và (iv) dự báo tải trọng gây phá hoại lớn hơn thực tế (Hình 3a). Đối với quan hệ Q - S có dạng đường cong rõ ràng như ở cọc TP2, các hàm số (i), (ii) và (iii) cho phép mô tả quan hệ này phù hợp với thực tế, kể cả cấp áp lực nén gây phá hoại (Hình 3b). Như vậy, có thể thấy rằng các hàm số xấp xỉ cho phép mô tả quan hệ Q - S phù hợp với kết quả thí nghiệm thực tế nên có thể sử dụng để đánh giá tải trọng giới hạn căn cứ việc chọn lựa hàm số và các tiêu chí phù hợp. Ở đây, cũng nên lưu ý rằng trừ một vài trường hợp cá biệt, hầu hết kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc đều cho thấy quan hệ Q - S có dạng đường cong khá rõ ràng.

Sử dụng các tiêu chí đánh giá giá trị tải trọng giới hạn kết hợp các hệ số của các hàm số thu nhận được từ kết quả tính toán, giá trị tải trọng giới hạn của cọc A111 và TP2 được tính toán và tổng hợp thể

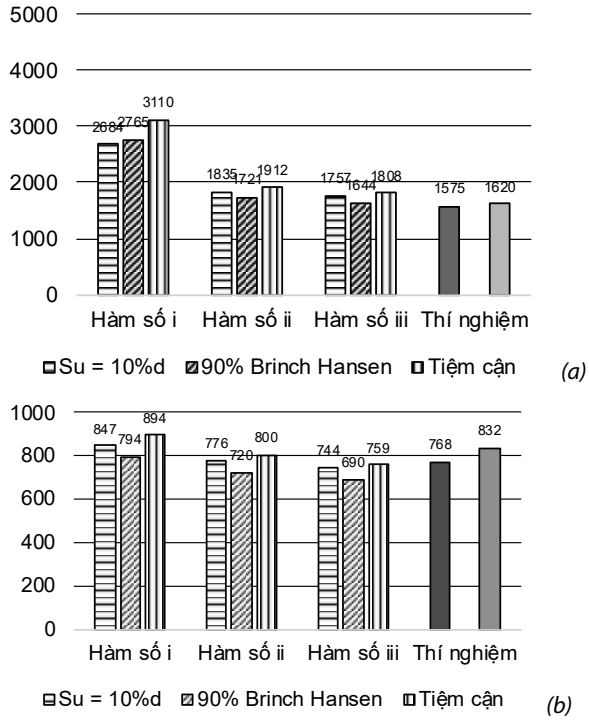
hiện ở Hình 4. Do hàm số (iv) có khuynh hướng dự báo giá trị tải trọng lớn hơn thực tế nên việc sử dụng chúng để đánh giá tải trọng giới hạn là không an toàn. Do đó, việc phân tích đánh giá giá trị tải trọng giới hạn theo các tiêu chí ở đây chỉ sử dụng 3 hàm số đầu tiên.

Về tổng thể, kết quả tổng hợp ở Hình 4 cho thấy tải trọng giới hạn có thể được đánh giá theo các hàm số xấp xỉ và các tiêu chí kể cả trường hợp quan hệ Q - S không có dạng đường cong rõ ràng. Tải trọng giới hạn tính toán theo hàm số (ii) và (iii) cũng cho giá trị xấp xỉ với kết quả thí nghiệm thực tế dù quan hệ Q - S không có dạng đường cong (cọc A111). Trường hợp quan hệ Q - S có dạng đường cong (cọc TP2), giá trị tải trọng giới hạn tính toán theo các phương pháp đề nghị phù hợp với kết quả thực tế. Trong trường hợp này, tải trọng giới hạn theo hàm số (ii) và (iii) tính toán theo các tiêu chí khác nhau có giá trị trong khoảng hai cấp tải sau cùng trước khi đạt đến giới hạn phá hoại. Ở đây, tải trọng giới hạn theo tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen tính theo hàm số (i) phù hợp với kết quả thí nghiệm nhưng kết quả sử dụng hai tiêu chí còn lại có xu hướng cho giá trị tải trọng giới hạn lớn hơn.

Có thể thấy rằng tiêu chuẩn tải trọng giới hạn tương ứng với độ lún 10%d khó có thể chấp nhận do không phù hợp trong trường hợp cọc có kích thước lớn như cọc khoan nhồi. Tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen chấp nhận độ lún giới hạn nhỏ hơn nên giá trị tải trọng giới hạn thu nhận cũng nhỏ hơn tương ứng. Có thể thấy rằng giá trị 90% do Brinch Hansen đề nghị đã được phân tích cẩn thận và chọn lựa làm tiêu chuẩn phù hợp. Rõ ràng tiêu chuẩn chọn giá trị tải trọng giới hạn tương ứng với giá trị tiệm cận khi độ lún phát triển liên tục cho kết quả giá trị tải trọng giới hạn lớn nhất. Tuy nhiên, có thể chọn lựa giới hạn giá trị tải trọng giới hạn theo tỷ lệ phù hợp ví dụ như khi đạt 90 hay 95% giá trị tiệm cận hay khống chế độ lún ở mức độ nào đó thì việc sử dụng hàm số để đánh giá giá trị tải trọng giới hạn là phương pháp có triển vọng áp dụng thực tế và rõ ràng.



Hình 3. Biểu đồ quan hệ Q - S của (a) - cọc A111 và (b) - cọc TP2 theo các hàm xấp xỉ khác nhau



Hình 4. Tải trọng giới hạn Q_u của (a) - cọc A111 và (b) - cọc TP2 theo các hàm số và tiêu chí khác nhau

Khi thí nghiệm nén tĩnh cho kết quả độ lún của cọc gia tăng đột ngột hay phát triển liên tục thì việc xác định giá trị tải trọng giới hạn hoàn toàn có thể thực hiện căn cứ các phương pháp và tiêu chí khác nhau theo các chỉ dẫn hay tiêu chuẩn. Trong trường hợp cấp tải sau cùng chưa đạt đến trạng thái giới hạn, có thể sử dụng các hàm số xấp xỉ để phân tích đánh giá quan hệ Q - S và thông qua các hệ số thu nhận được để thực hiện đánh giá tải trọng giới hạn. Kết quả tổng hợp ở Hình 5 thể hiện giá trị tải trọng giới hạn theo các hàm số và các tiêu chí khác nhau với dữ liệu thí nghiệm không xét đến cấp tải sau cùng, tức là kết quả thí nghiệm cọc chưa đạt đến trạng thái giới hạn.

Có thể thấy rằng hàm số (iii) cho phép đánh giá giá trị tải trọng giới hạn phù hợp ngay cả khi quan hệ Q - S có dạng gần như đường thẳng (Hình 5a, cọc A111). Ở đây, khi quan hệ Q – S thu nhận được có dạng đường thẳng thì việc sử dụng các hàm số phi tuyến ngoại suy quan hệ này khó có thể thực hiện với độ chính xác và an toàn cần thiết là điều có thể thấy được.

Trường hợp quan hệ Q - S có dạng đường cong rõ ràng, các hàm số (i), (ii) và (iii) đều có thể cho phép đánh giá tải trọng giới hạn hợp lý. Ở đây, giá trị tải trọng giới hạn theo hàm số (ii) và (iii) đều cho giá trị tải trọng giới hạn nhỏ hơn kết quả thí nghiệm thực tế còn giá trị này theo hàm số (i) phù hợp với kết quả thực tế, đặc biệt khi sử dụng tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen (Hình 5b). Như vậy, khi quan hệ Q - S có dạng đường cong rõ ràng, sử dụng các hàm số (i), (ii) và (iii) với các tiêu chí phù hợp có thể cho phép đánh giá giá trị tải trọng giới hạn kể cả trường hợp tải trọng thí nghiệm chưa đạt đến giới hạn.

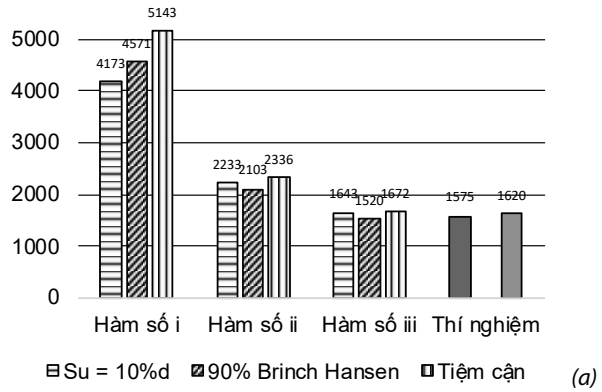
Quan hệ Q - S ngoại suy theo các hàm số khi không xét tải trọng ở trạng thái giới hạn thể hiện ở Hình 6. Có thể thấy rằng khi quan hệ Q - S có dạng đường cong, hàm số (i) mô tả quan hệ này phù hợp với thực tế hơn so với hàm số (ii) và (iii) có khuynh hướng an toàn hơn.

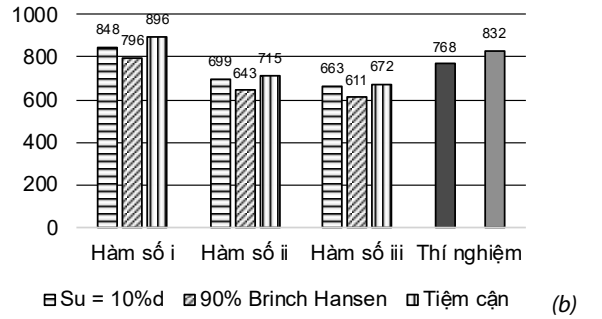
Đối với kết quả phân tích quan hệ Q - S không có dạng đường cong rõ ràng, sử dụng hàm số (i) cho kết quả đường cong quan hệ

có độ dốc thay đổi không đáng kể trước khi phá hoại và khác biệt so với kết quả thí nghiệm (Hình 3a và 6a). Tuy nhiên, khi quan hệ Q - S có dạng đường cong có độ dốc thay đổi từ từ trước khi phá hoại thì việc sử dụng hàm số (i) cho thấy quan hệ này phù hợp với kết quả thí nghiệm. Trường hợp tải trọng lớn nhất chưa đạt đến giá trị giới hạn, biểu đồ ngoại suy theo hàm số (i) cho kết quả xấp xỉ với kết quả thí nghiệm thực tế (Hình 3b và Hình 6b).

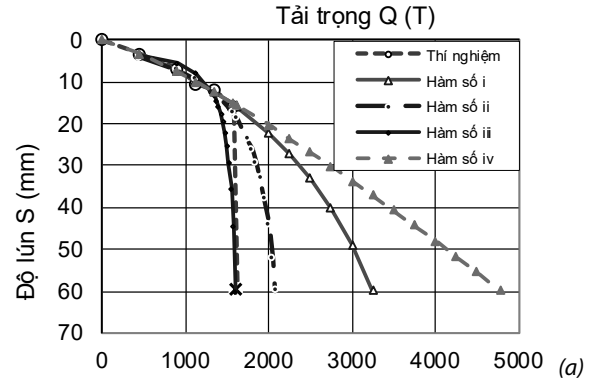
Hàm số (ii) cho phép thể hiện quan hệ Q - S khác biệt không đáng kể so với kết quả ghi nhận từ quan trắc thực tế kể cả trường hợp xét hay không xét cấp tải trọng giới hạn. Mặc dù vậy, giá trị tải trọng giới hạn ước tính theo hàm số (ii) vẫn phù hợp với thực tế.

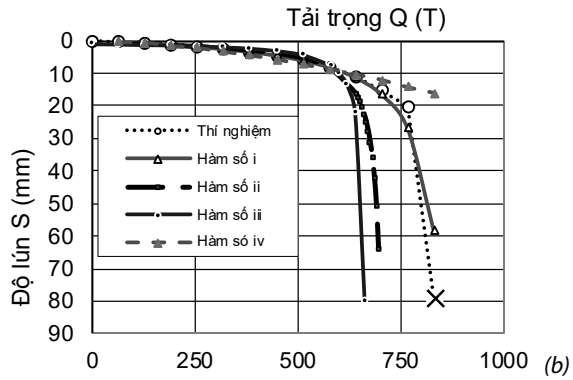
Hàm số (iii) cho phép mô tả quan hệ Q - S tương tự với kết quả thí nghiệm thực tế. Trường hợp bỏ qua cấp tải gây phá hoại, quan hệ Q - S theo hàm số (iii) dự báo tải trọng có khuynh hướng nhỏ hơn thực tế. Giá trị tải trọng giới hạn sử dụng hàm số (iii) phù hợp với kết quả thí nghiệm thực tế.





Hình 5. Tải trọng giới hạn Q_u của (a) - cọc A111 và (b) - cọc TP2 theo các hàm số và tiêu chí khác nhau khi không xét đến cấp tải trọng cuối cùng gây phá hoại





Hình 6. Biểu đồ quan hệ Q - S của (a) - cọc A111 và (b) - cọc TP2 theo các hàm xấp xỉ khác nhau không xét đến cấp tải trọng cuối cùng gây phá hoại

3. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Từ kết quả tổng hợp các phương pháp đánh giá khả năng chịu tải của cọc theo hàm số xấp xỉ, nghiên cứu đề nghị các tiêu chí đánh giá tải trọng giới hạn. Kết hợp phân tích áp dụng với dữ liệu thí nghiệm thực tế đối với hai trường hợp quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc phổ biến, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

- Các hàm số đề nghị cho phép mô tả phù hợp quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc theo kết quả thí nghiệm nén tĩnh. Các tiêu chí đề nghị từ kết quả nghiên cứu cho phép đánh giá tải trọng giới hạn và có độ tin cậy cần thiết nên có thể áp dụng để phân tích các bài toán thực tế.

- Hàm số (ii) và (iii) cho phép đánh giá tải trọng giới hạn phù hợp với kết quả thí nghiệm thực tế kể cả trường hợp kết quả thí nghiệm chưa đạt đến phá hoại.

- Hàm số (i) cho phép mô tả quan hệ tải trọng - độ lún đầu cọc phù hợp với kết quả thí nghiệm thực tế khi quan hệ này có dạng đường cong rõ ràng nên cho phép đánh giá tải trọng giới hạn hợp lý trong trường hợp này.

- Sử dụng tiêu chuẩn 90% Brinch Hansen xem tải trọng giới hạn tương ứng với độ lún bằng 2 lần độ lún ở 90% tải trọng giới hạn ($S_u = 2S_{90\%}$) cho phép đánh giá tải trọng giới hạn phù hợp với thực tế. Ở đây, tải trọng giới hạn theo tiêu chí độ lún S = 10%d hay theo giá trị tải trọng tiệm cận có xu hướng lớn hơn nên không an toàn đối với trường hợp cọc có kích thước lớn như cọc khoan nhồi.

Giá trị tải trọng giới hạn theo tiêu chí tải trọng tiệm cận theo các hàm số khác nhau có căn cứ rõ ràng và giá trị xác định ổn định nên nếu chọn lựa giới hạn theo tỷ lệ giá trị tải trọng giới hạn phù hợp thì phương pháp này có triển vọng áp dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 10304:2025. Thiết kế móng cọc, 2025.

[2] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9393:2012. Cọc - Phương pháp thử tĩnh hiện trường bằng tải trọng tĩnh ép dọc trục, 2012.

[3] Bengt H. Fellenius. Basic of Foundation Design. Electronic Edition, 2017.

[4] Shamsher Prakash and Harid Sharma. Móng cọc trong thực tế xây dựng (bản dịch). NXB. Xây dựng, 1999.

[5] Bùi Trường Sơn. Phân tích đánh giá khả năng chịu tải của cọc theo kết quả thí nghiệm nén tĩnh. Tuyển tập kết quả khoa học công nghệ 2016, tập 19, tr. 328-338, NXB. Nông nghiệp, 2017.

[6] Wong Charng Chen. Prediction of ultimate load bearing capacity of driven piles. M.A. thesis, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2006.

[7] Samuel G. Paikowsky and Terry A. Tolosko. Extrapolation of pile capacity from non-failed load test. US. FHWA-RD-99-170, 1999.

[8] Bengt H. Fellenius. What Capacity Value to Choose from the Results a Static Loading Test. Deep Foundation Institute, Fulcrum, pp. 19-26, 2001.

[9] Bùi Trường Sơn and Lê Tiến Nghĩa. Nghiên cứu thiết lập quan hệ tải trọng - độ lún từ kết quả nén tĩnh cọc bằng hàm số xấp xỉ. Tạp chí Xây dựng (Bộ Xây dựng) số tháng 10/2025, tr. 116-119, 2025.

■Ngày nhận bài: 28/9/2026 ■Ngày sửa bài: 14/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/10/2026

Cường độ tính toán của bê tông trong cột liên hợp theo Eurocode 4 thế hệ 2

Design concrete strength in composite columns under second-generation Eurocode 4

> TS MAI THỊ HẰNG[1,*], THS NGUYỄN HUY VỮNG[2]
[1]Khoa Xây dựng, Học viện Hàng không Việt Nam
[2]Viện Công nghệ xây dựng và Giao thông đô thị, Đại học Bình Dương
[*]Email: hangmt@vaa.edu.vn

TÓM TẮT

Eurocode 4 thế hệ 2 (EC4:2026) lấy cường độ tính toán của bê tông theo EN 1992-1-1:2023. Cách này thêm hệ số η_{cc} theo cấp độ bền và k_{tc} theo tải trọng dài hạn. Bài báo tính mức thay đổi sức kháng nén dẻo so với EC4:2004 và đối chiếu với 500 thí nghiệm. Khi k_{tc} = 0,85, hệ số hiệu dụng của cột ống thép nhồi bê tông giảm 15-21%; sức kháng hai ví dụ giảm 6-9%. Cột bọc chỉ giảm khi f_{ck} > 40 MPa, tối đa 7%; kết quả thí nghiệm của cột bọc chỉ để tham khảo. Với bê tông cường độ cao, dữ liệu ngắn hạn chỉ cho thấy xu hướng, chưa đủ để điều chỉnh η_{cc}. Khi chuyển sang EC4:2026, sức kháng tính toán của cột ống thép nhồi bê tông có thể giảm đến 17%.

Từ khóa: Cột liên hợp; cột ống thép nhồi bê tông; cường độ tính toán; Eurocode 4; Eurocode thế hệ 2; tải trọng dài hạn.

ABSTRACT

The second-generation Eurocode 4 (EC4:2026) takes the design strength of concrete in composite columns from EN 1992-1-1:2023. This adds a factor η_{cc} that depends on the concrete strength class and a factor k_{tc} for long-term loading. This paper calculates the change in plastic axial resistance relative to EC4:2004 and compares both methods with 500 short-column tests. With k_{tc} = 0.85, the effective concrete factor of concrete-filled steel tubes drops by 15-21%, and the resistance of two example columns drops by 6-9%. Concrete-encased columns are affected only when f_{ck} > 40 MPa, by at most 7%; their test comparison is indicative only. For high-strength concrete, the short-term data show only a trend and do not justify a change to η_{cc}. Under EC4:2026, the design resistance of concrete-filled tubes may therefore drop by up to 17%.

Keywords: Composite columns; concrete-filled steel tubes; design compressive strength; Eurocode 4; long-term loading; second-generation Eurocodes.

Ký hiệu chính

Ký hiệu	Ý nghĩa	Ký hiệu	Ý nghĩa
A_a, A_c, A_s	diện tích thép kết cấu, bê tông, cốt thép dọc	t_{ref}	tuổi tham chiếu của bê tông khi xác định f_{ck}
f_{ck}, f_{cm}	cường độ đặc trưng, trung bình của bê tông	α_{eff}	hệ số hiệu dụng của bê tông, CT (5)
f_{cd}	cường độ chịu nén tính toán của bê tông	α_{lim}	giới hạn của α_{eff}: 0,85 (cột bọc), 1,0 (CFST)
$f_{ck,ref}$	cường độ tham chiếu trong η_{cc} (khuyến nghị 40 MPa)	γ_C, γ_S, γ_{M0}	hệ số an toàn của bê tông, cốt thép, thép kết cấu
f_{yd}, f_{sd}	cường độ tính toán của thép kết cấu, cốt thép	δ	tỷ lệ đóng góp của thép kết cấu theo EC4
f_y, f_c, f_{ys}	cường độ đo của thép kết cấu, bê tông, cốt thép	δ^*	tỷ lệ đóng góp của toàn bộ thép, CT (7)
k_{tc}	hệ số xét tải trọng dài hạn, CT (3)	η_{cc}	hệ số theo cấp độ bền bê tông, CT (4)
$N_{pl,Rd}$	sức kháng nén dẻo tính toán	$\bar{\lambda}$	độ mảnh quy đổi của cột
$N_{pl,R}$	sức kháng nén dẻo tính với cường độ đo, CT (8)	ξ	hệ số bó, $\xi = A_a f_y/(A_c f_c)$
$N_{u,exp}$	sức chịu tải thí nghiệm	CFST, FEC, PEC	ống thép nhồi bê tông; thép hình bọc bê tông toàn phần, một phần

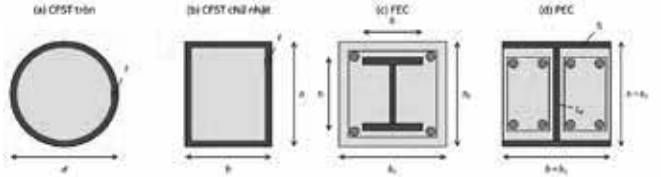
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cột liên hợp thép - bê tông có hai nhóm chính. Nhóm thứ nhất là cột ống thép nhồi bê tông (CFST). Nhóm thứ hai là cột thép hình bọc bê tông, gọi tắt là cột bọc, gồm bọc toàn phần (FEC) và bọc một phần (PEC) (Hình 1). Cột liên hợp chịu tải lớn, dẻo và thi công nhanh, nên được dùng nhiều trong nhà cao tầng [1]. Ở Việt Nam, Eurocode 4 đã được dùng làm cơ sở tính toán cột liên hợp trong các nghiên cứu gần đây [2, 3].

Eurocode thế hệ 2 thay đổi cách lấy cường độ tính toán của bê tông trong cột liên hợp. EN 1994-1-1:2026 (EC4:2026) được phát hành tháng 3/2026 [4]. Tiêu chuẩn này sẽ thay thế EN 1994-1-1:2004 (EC4:2004) từ tháng 3/2028 [5, 6]. Theo tiêu chuẩn mới, cường độ

này được lấy theo EN 1992-1-1:2023 (EC2:2023) [7]. Cách lấy này có thêm hai hệ số: η_{cc} theo cấp độ bền bê tông và k_{tc} xét tải trọng dài hạn. Cấp độ bền được ghi theo dạng C30/37, trong đó số đầu là f_{ck} (MPa). Vì hai hệ số mới nằm trong EC2:2023 chứ không nằm trong điều khoản về cột của EC4:2026, người thiết kế dễ bỏ sót chúng.

Bài báo trình bày chuỗi điều khoản xác định cường độ tính toán của bê tông theo EC4:2026 và tính mức thay đổi sức kháng nén dẻo so với EC4:2004. Hai cách tính được đối chiếu với dữ liệu thí nghiệm của Daei và cộng sự [8]. Từ đó, bài báo đề xuất cách chọn tham số khi Việt Nam chưa có Phụ lục quốc gia.



Hình 1. Tiết diện cột liên hợp điển hình và ký hiệu theo EC4: *(a) CFST tròn; (b) CFST chữ nhật; (c) FEC; (d) PEC*

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ CƠ SỞ TIÊU CHUẨN

2.1. Cường độ tính toán của bê tông theo EC4:2004

Phần này nêu cách tính của hai thế hệ tiêu chuẩn và các nghiên cứu liên quan. Theo EC4:2004, cường độ chịu nén tính toán của bê tông bằng cường độ đặc trưng chia cho hệ số an toàn [9]:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (1)$$

Sức kháng nén dẻo của tiết diện là tổng lực mà thép kết cấu, bê tông và cốt thép chịu được khi cùng đạt giới hạn [9]:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0{,}85\, A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (2)$$

trong đó A_a, A_c, A_s (mm²) là diện tích thép kết cấu, bê tông và cốt thép dọc; f_{yd}, f_{sd} (MPa) là cường độ tính toán của thép kết cấu và cốt thép. Hệ số 0,85 của cột bọc đã gồm ảnh hưởng của tải trọng dài hạn, giống hệ số α_{cc} của tiêu chuẩn bê tông cùng thế hệ. Với cột CFST, hệ số này bằng 1,0 vì ống thép kiềm chế nở ngang của bê tông. Phương pháp áp dụng cho bê tông C20/25 - C50/60 và thép S235 - S460 [10].

Trên hơn 3100 mẫu thí nghiệm, EC4:2004 cho dự báo sát và thiên về an toàn [11], và có thể mở rộng cho vật liệu cường độ cao [12, 13]. Ở trong nước, EC4:2004 đã được dùng để tính sức kháng nén và độ tin cậy của cột CFST [2, 3], nhưng chưa xét hai hệ số mới.

2.2. Chuỗi tham chiếu EC4:2026 → EC2:2023

EC4:2026 không cho trực tiếp cường độ tính toán của bê tông mà tham chiếu sang EC2:2023 [6, 7]:

$$f_{cd} = \eta_{cc}\, k_{tc}\, \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (3)$$

$$\eta_{cc} = \left(\frac{f_{ck,ref}}{f_{ck}}\right)^{1/3} \le 1{,}0 \quad (4)$$

Trong (4), $f_{ck,ref}$ là cường độ tham chiếu, với giá trị khuyến nghị 40 MPa. Hệ số η_{cc} kể đến việc bê tông cường độ cao có cường độ trong cấu kiện thấp hơn so với mẫu trụ. Hệ số này bằng 1 với bê tông đến C40/50 và giảm dần khi cường độ tăng, còn 0,74 tại f_{ck} = 100 MPa [7]. Hệ số k_{tc} kể đến sự giảm cường độ khi bê tông chịu tải trọng dài hạn ở mức ứng suất cao. Hiện tượng này được Rüsch chỉ ra từ năm 1960 [14].

Ghi chú của điều 5.1.6(1) trong EC2:2023 cho phép lấy k_{tc} = 1,0 khi thỏa mãn đồng thời hai điều kiện [7]. Thứ nhất, cường độ được xác định ở tuổi không quá 28 ngày, hoặc 56 ngày với xi măng đóng rắn chậm. Thứ hai, tải thiết kế không tác dụng trước 3 tháng kể từ khi đổ bê tông. Các trường hợp khác lấy k_{tc} = 0,85. Cả $f_{ck,ref}$ và k_{tc} đều là tham số quốc gia.

Theo [4, 6], EC4:2026 tham chiếu sang EC2:2023 tại điều 4.4.1.2(2). Điều 5.1(3) đặt giới hạn trên cho tích $\eta_{cc}{\cdot}k_{tc}$ khi dùng sức kháng nén dẻo: 0,85 với cột bọc và 1,0 với cột CFST. Vì vậy, công thức sức kháng nén dẻo (8.37) có dạng như (2), nhưng hệ số giới hạn đã nằm trong f_{cd} [6].

Phạm vi áp dụng cho cột gần như không đổi [6]. Bê tông từ C60/75, bê tông nhẹ (điều 8.8.1(3)) và thép trên S460 (điều 5.3(2)) nằm ngoài phạm vi này. Phạm vi chung của EC4:2026 là C20/25 - C70/85 (điều 5.1(4)), nên C55/67 có thể vẫn áp dụng được cho cột. Bài báo chỉ xét đến C50/60 để so sánh với EC4:2004. Công thức hiệu ứng bó và giới hạn mất ổn định cục bộ được giữ nguyên [6].

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Hệ số hiệu dụng và tỷ số sức kháng

Để định lượng các thay đổi trên, bài báo dùng hai đại lượng. Đại lượng thứ nhất là hệ số hiệu dụng α_{eff}. Nó bằng ứng suất bê tông dùng trong tính toán chia cho f_{ck}/γ_C:

$$\alpha_{eff} = \frac{f_{cd}\,\gamma_C}{f_{ck}} = \min(\eta_{cc}\, k_{tc};\ \alpha_{lim}) \quad (5)$$

trong đó α_{lim} bằng 0,85 với cột bọc và 1,0 với cột CFST. Theo EC4:2004, hệ số hiệu dụng luôn bằng giới hạn này.

Đại lượng thứ hai là tỷ số sức kháng nén dẻo giữa hai thế hệ. Vì chỉ phần bê tông thay đổi, tỷ số này chỉ phụ thuộc vào hai yếu tố. Đó là tỷ lệ đóng góp của toàn bộ thép δ^* và tỷ số hai hệ số hiệu dụng:

$$\frac{N_{pl,Rd,2026}}{N_{pl,Rd,2004}} = \delta^* + (1-\delta^*)\frac{\alpha_{eff,2026}}{\alpha_{eff,2004}} \quad (6)$$

$$\delta^* = \frac{A_a f_{yd} + A_s f_{sd}}{N_{pl,Rd,2004}} \quad (7)$$

δ^* là ký hiệu do bài báo định nghĩa. Nó gồm cả thép kết cấu và cốt thép dọc, nên khác với δ của EC4 chỉ tính thép kết cấu.

3.2. Ví dụ tính toán

Bốn tiết diện thường gặp trong nhà cao tầng được dùng làm ví dụ, gồm hai cột CFST và hai cột bọc. Mỗi tiết diện được tính theo EC4:2004 và EC4:2026, với k_{tc} lần lượt bằng 1,0 và 0,85. Hệ số an toàn lấy theo giá trị khuyến nghị [7, 15]. Hiệu ứng bó của cột CFST tròn không được xét, để bốn tiết diện có cùng cơ sở so sánh.

3.3. Dữ liệu thí nghiệm

Dữ liệu đối chiếu lấy từ cơ sở dữ liệu cột ngắn chịu nén đúng tâm của Daei và cộng sự [8]. Cường độ bê tông trong [8] đã được quy đổi về mẫu trụ 150 × 300 mm. Với các mẫu chưa đạt tải đỉnh ở biến dạng dọc trục 1%, sức chịu tải thí nghiệm $N_{u,exp}$ được lấy tại biến dạng này. Bài báo chỉ giữ các mẫu nằm trong phạm vi phương pháp đơn giản của EC4:2004; tiêu chí lọc và số mẫu còn lại nêu trong Bảng 1. Nhóm PEC bị loại vì mọi mẫu đạt tiêu chí đều dùng thép chữ thập. EC4:2004 chỉ cho giới hạn mất ổn định cục bộ với tiết diện chữ I.

Bảng 1. Số mẫu thí nghiệm theo bước lọc

Bước lọc	CFST tròn	CFST chữ nhật	FEC	PEC	Tổng
Cơ sở dữ liệu [8]	1192	802	96	66	2156
Trong phạm vi EC4, $f_{ck} = f_{cm}$ - 8 MPa	342	143	15	0	500
Độ nhạy: $f_{ck} = f_{cm}$ - 4 MPa	368	132	16	0	516
Độ nhạy: $f_{ck} = f_{cm}$ - 12 MPa	322	130	6	0	458

Tiêu chí: f_{ck} = 20 – 50 MPa; giới hạn chảy đo được 235 – 460 MPa; thỏa mãn giới hạn mất ổn định cục bộ; δ = 0,2 – 0,9 (điều 6.7.1(4)); không có cốt sợi thép. Mẫu còn lại có $\bar{\lambda} \le 0{,}24$; 13/15 mẫu FEC vượt giới hạn lớp bọc tính toán của điều 6.7.3.1(2).

Với FEC, toàn bộ bê tông được tính vào sức kháng. Giới hạn lớp bọc của điều 6.7.3.1(2) không được áp dụng vì chỉ nhằm vào biểu đồ tương tác mô men - lực dọc [6]. Một mẫu có lớp bọc 39 mm, dưới mức tối thiểu 40 mm của điều 6.7.5.1(2). Kết quả FEC được nêu cho cả hai trường hợp giữ và loại mẫu này.

Sức kháng được tính với cường độ đo và hệ số an toàn bằng 1. Như vậy, phép so sánh chỉ đánh giá riêng mô hình tính toán:

$$N_{pl,R} = A_a f_y + \alpha_{eff}\, A_c f_c + A_s f_{ys} \quad (8)$$

trong đó f_y, f_c, f_{ys} (MPa) là cường độ đo của thép kết cấu, bê tông và cốt thép; α_{eff} lấy theo (5). Với cột CFST tròn, bài báo tính thêm phương án xét hiệu ứng bó theo điều 6.7.3.2(6) của EC4:2004 [9]. Khi đó, phần bê tông, kể cả phần tăng do bó, cũng được nhân với α_{eff}. Mức phù hợp được đánh giá bằng các thống kê trong Bảng 4.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Hệ số hiệu dụng theo cấp độ bền bê tông

Thông số thứ nhất là hệ số hiệu dụng α_{eff} của các cấp độ bền từ C20/25 đến C50/60 (Bảng 2). Khi k_{tc} = 0,85, hệ số hiệu dụng của cột CFST giảm 15 - 21%. Nguyên nhân là EC4:2004 cho phép lấy 1,0 với loại cột này, còn EC4:2026 nhân thêm k_{tc}. Ở cột bọc, giới hạn 0,85 trùng với k_{tc} = 0,85, nên hệ số hiệu dụng chỉ giảm với bê tông trên C40/50. Như vậy, trong phạm vi đến C50/60, k_{tc} ảnh hưởng nhiều hơn η_{cc}.

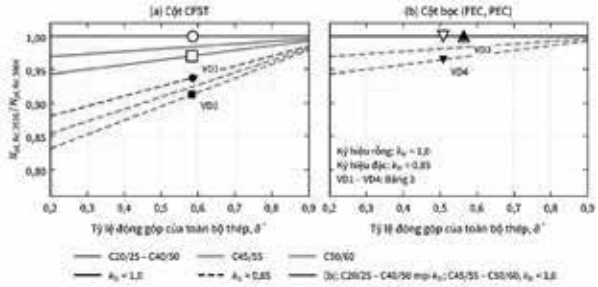
Bảng 2. Hệ số hiệu dụng $\alpha_{eff} = f_{cd}\cdot\gamma_C/f_{ck}$ theo EC4:2004 và EC4:2026 (C55/67 - giá trị tham khảo)

Cấp độ bền	f_{ck} (MPa)	η_{cc}	CFST: 2004	CFST: 2026, k_{tc} = 1,0	CFST: 2026, k_{tc} = 0,85	Bọc: 2004	Bọc: 2026, k_{tc} = 1,0	Bọc: 2026, k_{tc} = 0,85
C20/25 – C40/50	20 – 40	1,000	1,000	1,000	0,850	0,850	0,850	0,850
C45/55	45	0,961	1,000	0,961	0,817	0,850	0,850	0,817
C50/60	50	0,928	1,000	0,928	0,789	0,850	0,850	0,789
C55/67	55	0,899	1,000	0,899	0,764	0,850	0,850	0,764

4.2. Ảnh hưởng đến sức kháng nén dẻo

Thông số thứ hai là tỷ số sức kháng nén dẻo theo (6), xét theo δ^* (Hình 2). Tỷ số này giảm tuyến tính khi δ^* giảm, vì khi thép chiếm tỷ trọng nhỏ, phần bê tông bị giảm chiếm phần lớn sức kháng. Trường hợp bất lợi nhất là cột CFST dùng C50/60 với k_{tc} = 0,85: khi δ^* = 0,2, sức kháng giảm 17%. Vì vậy, cột CFST có ít thép chịu ảnh hưởng nhiều nhất.

Bốn ví dụ trong Bảng 3 nằm đúng trên các đường của Hình 2. Khi k_{tc} = 0,85, hai cột CFST giảm 6 - 9%, còn hai cột bọc giảm nhiều nhất 3,5%.



Hình 2. Tỷ số $N_{pl,Rd,2026}/N_{pl,Rd,2004}$ theo δ^*: *(a) cột CFST; (b) cột bọc* (VD1 - VD4 theo Bảng 3)

Bảng 3. Sức kháng nén dẻo $N_{pl,Rd}$ của bốn ví dụ (thép S355, cốt thép B500; γ_C = 1,50; γ_S = 1,15; γ_{M0} = 1,00; CFST chữ nhật tính góc vuông; thép H bỏ qua bán kính lượn)

Ví dụ	Tiết diện	δ^*	EC4:2004 (kN)	EC4:2026, k_{tc} = 1,0 (kN)	EC4:2026, k_{tc} = 0,85 (kN)
VD1	CFST tròn D406,4×10 (d/t = 40,6 ≤ 59,6); C40/50	0,59	7548	7548 (0,0%)	7079 (–6,2%)
VD2	CFST chữ nhật 400×400×12 (h/t = 33,3 ≤ 42,3); C50/60	0,58	11324	10986 (–3,0%)	10330 (–8,8%)
VD3	FEC 600×600, H400×400×12×20, 12Φ25, lớp bọc 100 mm; C40/50	0,56	17341	17341 (0,0%)	17341 (0,0%)
VD4	Như VD3, bê tông C50/60	0,51	19232	19232 (0,0%)	18554 (–3,5%)

4.3. Đối chiếu với dữ liệu thí nghiệm

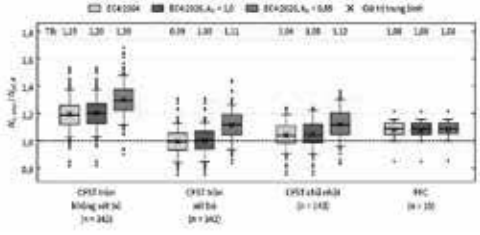
Thông số thứ ba là mức phù hợp giữa sức kháng tính theo (8) và 500 mẫu thí nghiệm (Bảng 4). Với EC4:2004, trên 80% mẫu CFST chữ nhật và mẫu FEC nằm trong dải sai lệch ±15%. Mẫu CFST tròn có tỷ số cao hơn hẳn, vì công thức (8) bỏ qua hiệu ứng bó. Khi xét bó, tỷ số trung bình gần bằng 1 nhưng khoảng một nửa số mẫu có tỷ số nhỏ hơn 1.

Bảng 4. Thống kê tỷ số $N_{u,exp}/N_{pl,R}$

Nhóm mẫu	Số mẫu	TB, EC4:2004	TB, k_{tc} = 1,0	TB, k_{tc} = 0,85	Hệ số biến động	P5%, EC4:2004	P5%, k_{tc} = 0,85	Trong ±15%	Tỷ số < 1
CFST tròn, không xét bó	342	1,19	1,20	1,30	0,10	1,02	1,12	35%	3%
CFST tròn, xét bó	342	0,99	1,00	1,11	0,09	0,84	0,93	88%	54%
CFST chữ nhật	143	1,04	1,05	1,12	0,09	0,90	0,96	82%	35%
FEC, giữ mẫu C50e0	15	1,08	1,08	1,08	0,08	0,95	0,95	80%	13%
FEC, loại mẫu C50e0	14	1,10	1,10	1,10	0,06	1,00	1,00	86%	7%

TB: giá trị trung bình; P5%: phân vị 5%. Hệ số biến động và hai cột cuối tính theo EC4:2004. Nếu lấy tải đỉnh thay cho tải tại biến dạng 1%, CFST tròn xét bó có TB = 1,02 và 45% mẫu có tỷ số < 1.

Thông số thứ tư là ảnh hưởng của cách lấy f_{cd} đến tỷ số trên (Hình 3). Hệ số η_{cc} gần như không làm thay đổi kết quả. Lý do là chỉ khoảng 30% mẫu CFST dùng bê tông trên C40/50, và ở các cấp này η_{cc} chỉ giảm nhẹ. Ngược lại, k_{tc} = 0,85 làm tỷ số trung bình của CFST tăng 8 – 12%, vì phần bê tông trong sức kháng tính toán giảm đi. Với FEC, tỷ số trung bình gần như không đổi; kết quả này chỉ để tham khảo vì nhóm chỉ có 15 mẫu.



Hình 3. Phân bố tỷ số $N_{u,exp}/N_{pl,R}$ theo loại tiết diện và cách xác định f_{cd}; CFST tròn tính không xét và có xét bó (hộp: tứ phân vị 25% - 75%; râu: phân vị 5% - 95%)

5. THẢO LUẬN

Các kết quả trên dựa trên thí nghiệm ngắn hạn, chủ yếu đến C50/60. Phần này bàn về giới hạn của dữ liệu, bê tông cường độ cao và cách chọn tham số khi áp dụng.

5.1. Hệ số k_{tc} và dữ liệu ngắn hạn

Dữ liệu ngắn hạn không đủ để đánh giá k_{tc}. Mọi mẫu trong [8] được nén đến phá hoại trong thời gian ngắn, nên không chịu suy giảm do tải trọng dài hạn. Vì vậy, phần tỷ số tăng thêm khi lấy k_{tc} = 0,85 chính là phần tiêu chuẩn dành cho tải trọng dài hạn. Bê tông lõi CFST được kiềm chế nở ngang và hầu như không co ngót khô [6], nên chưa rõ có suy giảm như bê tông thường hay không. Cần thí nghiệm dài hạn trên cột CFST để trả lời [16].

5.2. Hệ số η_{cc} với bê tông cường độ cao

Hệ số η_{cc} giảm còn 0,74 tại f_{ck} = 100 MPa. Bài báo kiểm tra mức giảm này bằng hồi quy tuyến tính của tỷ số thí nghiệm/tính toán theo f_{ck} (Bảng 5). Mẫu dùng là các cột CFST có cường độ bê tông 20 - 100 MPa, với α_{eff} = 1,0. Mô hình có kiểm soát hệ số bó và độ mảnh thành ống; sai số chuẩn được gom theo nguồn tài liệu.

Bảng 5. Hệ số góc của tỷ số $N_{u,exp}/N_{pl,R}$ theo f_{ck} (CFST, f_{ck} = 20 – 100 MPa; trên mỗi 10 MPa)

Nhóm mẫu	Số mẫu (nguồn)	Hệ số góc	Khoảng tin cậy 95%	Hệ số góc khi dùng η_{cc}
CFST tròn, xét bó	635 (90)	+0,014	+0,003 đến +0,024	+0,050
CFST chữ nhật	224 (47)	–0,013	–0,024 đến –0,002	+0,014

Với cột CFST tròn, tỷ số tăng nhẹ khi f_{ck} tăng, nên dữ liệu không cho thấy cần giảm thêm hệ số hiệu dụng. Nếu áp dụng η_{cc}, xu hướng tăng còn rõ hơn. Ngay với f_{ck} = 20 - 30 MPa, tỷ số trung bình chỉ là 0,90 - 0,98. Giá trị này tùy chiều dài tính toán lấy bằng toàn bộ hay một nửa chiều dài mẫu. Như vậy, công thức hiệu ứng bó của EC4:2004 có thể đánh giá cao sức kháng 2 - 11%.

Với cột CFST chữ nhật, tỷ số giảm khi f_{ck} tăng, nên dữ liệu cho thấy cần giảm hệ số hiệu dụng. Tuy vậy, mức giảm cần thiết nhỏ hơn mức của η_{cc}. Ở dải 80 - 100 MPa, hệ số cần để tỷ số trung bình bằng 1 là 0,92, trong khi η_{cc} trung bình là 0,77.

Các nhận định ở mục này cần được hiểu thận trọng. Chúng nằm ngoài phạm vi áp dụng cho cột của EC4:2026, và dải 80 - 100 MPa chỉ có 16 mẫu CFST chữ nhật. Vì vậy, đây chỉ là xu hướng của dữ liệu ngắn hạn, chưa đủ cơ sở để điều chỉnh η_{cc}.

5.3. Chọn tham số quốc gia khi áp dụng tại Việt Nam

Giá trị k_{tc} phụ thuộc vào tiến độ thi công và vị trí cột, chứ không chỉ vào vật liệu. Với tiến độ 7 - 10 ngày một sàn, sau 3 tháng phía trên cột mới có khoảng 9 - 13 sàn. Số sàn này chỉ là phần nhỏ của nhà 40 tầng, nhưng đã là phần lớn của nhà 15 tầng. Vì vậy, chỉ cột các tầng dưới của nhà đủ cao mới có cơ sở lấy k_{tc} = 1,0. Các trường hợp còn lại, kể cả khi dùng cường độ ở tuổi sớm, lấy k_{tc} = 0,85. Vì EC2:2023 không nói rõ "tải thiết kế" là toàn bộ hay một phần tải [7], giá trị chọn và giả thiết tiến độ cần được ghi trong thuyết minh.

5.4. Giới hạn của nghiên cứu

Kết quả phụ thuộc vào cách ước tính f_{ck} từ f_{cm}. Khi thay đổi cách ước tính (Bảng 1), tỷ số trung bình của CFST thay đổi dưới 0,02, nhưng số mẫu FEC biến động mạnh. Nhóm FEC còn ít mẫu, và một nguồn chiếm 40% số mẫu. Ngoài ra, bài báo chỉ xét cột ngắn chịu nén đúng tâm, lọc mẫu theo giới hạn chảy đo được và chưa đánh giá độ tin cậy theo EN 1990.

6. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Từ các kết quả trên, có thể rút ra các kết luận sau:

- Theo EC4:2026, cường độ tính toán của bê tông được lấy qua EC2:2023 và bị giới hạn theo loại cột. Với giá trị khuyến nghị và k_{tc} = 0,85, hệ số hiệu dụng của cột CFST giảm 15 - 21%. Ở cột bọc, hệ số này chỉ giảm 4 - 7% với C45/55 và C50/60.

- Mức giảm sức kháng nén dẻo bằng (1 - δ^*) lần mức giảm của hệ số hiệu dụng. Trong phạm vi đến C50/60, mức giảm lớn nhất khoảng 17%, ở cột CFST có δ^* = 0,2; nếu C55/67 được áp dụng cho cột, mức này khoảng 19%.

- Đối chiếu với 500 mẫu thí nghiệm ngắn hạn, η_{cc} gần như không làm thay đổi kết quả đến C50/60. Hệ số k_{tc} = 0,85 làm tỷ số trung bình của cột CFST tăng 8 - 12%. Kết quả cho cột bọc chỉ để tham khảo vì chỉ có 15 mẫu. Với bê tông cường độ cao, dữ liệu chỉ cho thấy xu hướng, chưa đủ cơ sở để điều chỉnh η_{cc}.

Với người thiết kế, cần lưu ý một số điểm sau:

- Ghi rõ $f_{ck,ref}$, k_{tc} và giả thiết tiến độ chất tải trong thuyết minh tính toán.

- Dùng công thức (6) hoặc Hình 2 để ước tính nhanh mức thay đổi sức kháng khi chuyển từ EC4:2004 sang EC4:2026.

- Không áp dụng quy định về cột của EC4:2026 cho bê tông từ C60/75 hoặc thép trên S460, dù EC2:2023 và EN 1993-1-1:2022 đã có các vật liệu này. Khi áp dụng, nên đối chiếu nguyên văn điều 5.1 và 8.8.3 của EN 1994-1-1:2026 [4].

Nghiên cứu tiếp theo cần làm rõ sự suy giảm cường độ của bê tông lõi CFST dưới tải trọng dài hạn. Cũng cần xét ảnh hưởng của hai hệ số mới đến cột mảnh và cột chịu nén lệch tâm. Ngoài ra, cần kiểm tra công thức hiệu ứng bó với cột ngắn và hiệu chỉnh độ tin cậy theo EN 1990.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] LH Han, W Li and R Bjorhovde. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. Journal of Constructional Steel Research, vol. 100, pp. 211-228, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016.

[2] Cao Van Vui, Nguyen Hong An and Bui Van Ho. Load-carrying capacity of circular concrete filled steel tubes under axial loading: Reliability analyses. Ho Chi Minh City Open University Journal of Science - Engineering and Technology, vol. 13, no. 1, pp. 33-44, 2023, doi: 10.46223/HCMCOUJS.tech.en.13.1.2549.2023.

[3] Nguyễn Quang Sĩ, Nguyễn Hoàng Quân, Lê Đăng Dũng, Nguyễn Thanh Quý, Phan Cảnh Tiên. Nghiên cứu ứng xử chịu nén đúng tâm của cột ống thép nhồi bê tông. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, tập 13, số 02, tr. 31-36, 2023. Internet: https://vjol.info.vn/tcvienvatlieu/article/view/93672 (truy cập: tháng 9/2026).

[4] CEN. EN 1994-1-1:2026 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2026 (published by BSI on 31 March 2026).

[5] SJ Hicks. Second-generation of Eurocode 4 - Key changes. 12th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2025), Singapore, 9-12 December 2025.

[6] RP Johnson and SJ Hicks. Designers' Guide to EN 1994-1-1:2026. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 3rd ed. Leeds: Emerald Publishing, 2025, ISBN 978-1-83662-921-4.

[7] CEN. EN 1992-1-1:2023 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2023.

[8] A Daei, B Ahmed, U Katwal, MK Hassan and Z Tao. Short concrete-filled and concrete encased steel columns under axial compression: A comprehensive test database. Research Report R2-2024, Centre for Infrastructure Engineering, Western Sydney University, Sydney, 2024, doi: 10.13140/RG.2.2.31438.27206.

[9] CEN. EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

[10] K Roik and R Bergmann. Composite columns. In: Constructional Steel Design - An International Guide (PJ Dowling, JE Harding and R Bjorhovde, eds.), pp. 443-469. London: Elsevier Applied Science, 1992.

[11] S Thai, H-T Thai, B Uy and T Ngo. Concrete-filled steel tubular columns: Test database, design and calibration. Journal of Constructional Steel Research, vol. 157, pp. 161-181, 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.02.024.

[12] JYR Liew, MX Xiong and DX Xiong. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete. Structures, vol. 8, pp. 213-226, 2016, doi: 10.1016/j.istruc.2016.05.005.

[13] H-T Thai, S Thai, T Ngo, B Uy, W-H Kang and SJ Hicks. Reliability considerations of modern design codes for CFST columns. Journal of Constructional Steel Research, vol. 177, Art. no. 106482, 2021, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106482.

[14] H Rüsch. Researches toward a general flexural theory for structural concrete. ACI Journal Proceedings, vol. 57, no. 7, pp. 1-28, 1960, doi: 10.14359/8009.

[15] CEN. EN 1993-1-1:2022 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2022.

[16] LH Han, Z Tao and W Liu. Effects of sustained load on concrete-filled hollow structural steel columns. Journal of Structural Engineering, vol. 130, no. 9, pp. 1392-1404, 2004, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:9(1392).

■Ngày nhận bài: 28/9/2026 ■Ngày sửa bài: 10/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Xây dựng mô hình tích hợp SAP2000-OAPI và thuật toán đa mục tiêu - áp dụng tối ưu trọng lượng và độ cứng kết cấu mái lưới thép nhịp lớn

Integration of SAP2000-OAPI and multi-objective optimization for weight - stiffness trade-off in large-span steel grid roof structures

> KS NGUYỄN THỊ NGỌC PHƯƠNG[1], PGS.TS TRƯƠNG ĐÌNH NHẬT[2,*], PGS.TS NGUYỄN HỮU ANH TUẤN[2], THS LÊ THỊ THÙY LINH[3]

[1]HVCH Ngành Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[3]GV Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng
[*]Email: nhat.truongdinh@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Đề tài tập trung nghiên cứu tối ưu hóa kết cấu mái lưới thép nhịp lớn với ba mục tiêu chính: giảm khối lượng tiết diện, kiểm soát chuyển vị và xác định chiều cao công trình hợp lý. Mô hình kết cấu được xây dựng và tích hợp giữa phần mềm SAP2000 thông qua giao diện OAPI với thuật toán tối ưu đa mục tiêu, nhằm tối ưu trọng lượng, cao trình và độ cứng của kết cấu mái lưới thép nhịp lớn; trong đó, cao trình được xem xét thông qua sự thay đổi chiều cao và chuyển vị tại đỉnh mái. Mô hình cho phép tự động hóa quá trình tính toán, phân tích và thay đổi các tham số thiết kế. Trên cơ sở đó, thuật toán tối ưu đa mục tiêu được áp dụng để tìm kiếm tập nghiệm Pareto, giúp lựa chọn các phương án thiết kế cân bằng giữa yêu cầu kinh tế và kỹ thuật. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đề xuất không chỉ giúp giảm lượng vật liệu sử dụng mà còn đảm bảo điều kiện làm việc và độ ổn định của kết cấu, góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế các công trình mái nhịp lớn trong thực tế.

Từ khóa: Mái lưới thép; tối ưu đa mục tiêu; SAP2000-OAPI; chuyển vị; tập Pareto.

ABSTRACT

This study focuses on the multi-objective optimization of large-span steel grid structures, considering three main objectives: minimizing structural weight, controlling structural displacement, and determining an appropriate roof height. An integrated computational model is developed by coupling SAP2000 through its OAPI (Open Application Programming Interface) with a multi-objective optimization algorithm to optimize the structural weight, roof height, and stiffness of the large-span steel grid roof. In this framework, the roof height is evaluated through variations in the roof height and the displacement at the roof apex, thereby allowing the geometric configuration and structural response to be considered simultaneously. The integrated model enables the automation of structural analysis, design-variable modification, and iterative optimization. Subsequently, the multi-objective optimization algorithm is employed to identify the Pareto-optimal solutions, providing a set of alternative designs that achieve a suitable balance between economic and structural performance. The results demonstrate that the proposed approach can reduce material consumption while maintaining the required structural performance, serviceability, and stability, thereby improving the efficiency and reliability of the design of large-span steel roof structures.

Keywords: Steel grid roof; multi-objective optimization; SAP2000-OAPI; Pareto front.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, các công trình có không gian lớn như nhà thi đấu, nhà triển lãm, sân vận động và nhà công nghiệp ngày càng được xây dựng phổ biến, kéo theo nhu cầu phát triển các dạng kết cấu mái nhịp lớn. Trong đó, mái lưới thép được đánh giá là giải pháp hiệu quả nhờ khả năng vượt nhịp lớn, phân bố nội lực hợp lý, trọng lượng nhẹ và tính thẩm mỹ cao [1]. Tuy nhiên, việc thiết kế loại kết cấu này vẫn còn nhiều thách thức do chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố như hình học, tải trọng, điều kiện liên kết và đặc trưng vật liệu.

Trong thực tế thiết kế, các phương pháp truyền thống thường dựa trên kinh nghiệm hoặc thử-sai, dẫn đến khó đạt được phương án tối ưu toàn diện. Đặc biệt, các yêu cầu về giảm khối lượng kết cấu, kiểm soát chuyển vị và đảm bảo ổn định thường mâu thuẫn với nhau, đòi hỏi phải có cách tiếp cận tối ưu hóa đa mục tiêu để tìm ra lời giải hợp lý nhất [1, 2, 3].

Sự phát triển của công nghệ tính toán và các phần mềm phân tích kết cấu như SAP2000, kết hợp với giao diện lập trình ứng dụng (OAPI), đã mở ra khả năng tự động hóa quá trình phân tích và thiết kế [2, 4]. Đồng thời, các thuật toán tối ưu hóa hiện đại cho phép xử lý hiệu quả các bài toán phức tạp, đa mục tiêu, giúp tìm kiếm tập nghiệm Pareto thay vì một nghiệm đơn lẻ.

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn đó, đề tài này tập trung nghiên cứu phương pháp tối ưu hóa kết cấu mái lưới thép nhịp lớn bằng cách tích hợp SAP2000-OAPI với thuật toán tối ưu đa mục tiêu. Mục tiêu nhằm đề xuất quy trình thiết kế hiệu quả, góp phần nâng cao chất lượng và tính kinh tế cho các công trình kết cấu nhịp lớn.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC

Kết cấu thép được ứng dụng rộng rãi trong các công trình nhịp lớn nhờ ưu điểm về cường độ, trọng lượng nhẹ và khả năng vượt nhịp [1]. Sự phát triển của các phần mềm như SAP2000 và Tekla Structures đã hỗ trợ hiệu quả cho việc phân tích và thiết kế kết cấu [2, 4]. Đồng thời, các tiêu chuẩn như TCVN 5575:2024 và TCVN 2737:2023 là cơ sở đảm bảo an toàn thiết kế [5, 6].

Tuy nhiên, các nghiên cứu tối ưu trước đây chủ yếu tập trung vào bài toán đơn mục tiêu (như giảm trọng lượng), trong khi bài toán đa mục tiêu với các yếu tố mâu thuẫn như trọng lượng và độ cứng vẫn còn hạn chế. Trong bối cảnh đó, sự phát triển của trí tuệ nhân tạo và các thuật toán tối ưu hiện đại cho phép giải quyết hiệu quả các bài toán phức tạp.

Vì vậy, đề tài hướng tới việc kết hợp trí tuệ nhân tạo với phần mềm SAP2000 thông qua OAPI nhằm xây dựng quy trình tối ưu hóa tự động cho kết cấu thép trong điều kiện đa mục tiêu, góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế.

2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng để phân tích kết cấu mái lưới thép bằng cách rời rạc hóa thành các phần tử thanh liên kết tại các nút. Trên cơ sở đó, thiết lập hệ phương trình cân bằng để xác định nội lực và chuyển vị của kết cấu dưới tác dụng của các loại tải trọng.

Mô hình được xây dựng và phân tích bằng phần mềm SAP2000, xét đến các điều kiện liên kết và tải trọng theo tiêu chuẩn. Thông qua OAPI, các thông số như tiết diện và hình học được tự động cập nhật trong quá trình tối ưu [2, 4]. Kết quả FEM là cơ sở để đánh giá các hàm mục tiêu và phục vụ bài toán tối ưu đa mục tiêu.

2.2. Điều kiện ràng buộc đối với thanh chịu kéo-nén

Các điều kiện ràng buộc của cấu kiện chịu kéo-nén theo TCVN, như sau [5, 6]:

- Điều kiện bền theo mục 7.1.1 của TCVN 5575:2024:

$$\frac{N}{Af_{yd}\gamma_c} \le 1 \quad (1)$$

- Điều kiện ổn định theo mục 7.1.2 của TCVN 5575:2024:

$$\frac{N}{\varphi Af_{yd}\gamma_c} \le 1 \quad (2)$$

- Điều kiện độ mảnh theo mục 10.4.1 của TCVN 5575:2024:

$$\lambda = \frac{L_0}{i_{min}} \le [\lambda_u] \quad (3)$$

- Điều kiện võng theo phụ lục G.2 của TCVN 2737:2023:

$$\Delta \le [\Delta] = \frac{L}{300} \quad (4)$$

Trong đó: A là diện tích tiết diện ngang của thanh; N là lực dọc trong thanh; f_{yd} là cường độ kéo nén, uốn tính toán của thép lấy theo giới hạn chảy; γ_c là hệ số điều kiện làm việc; λ là độ mảnh của thanh; φ hệ số ổn định khi nén đúng tâm.

2.3. Lý thuyết tối ưu đa mục tiêu

Các bài toán tối ưu kết cấu mái lưới thép có tính phi tuyến, nhiều ràng buộc và đa mục tiêu, do đó các thuật toán metaheuristic được sử dụng để tìm nghiệm tối ưu hiệu quả [1, 3, 7].

Trong nghiên cứu này, các thuật toán tối ưu đa mục tiêu được áp dụng gồm: MOPSO [7, 8], MOED [9], MOPWO [10] và MOSAPSO [11]. Các phương pháp này có khả năng tìm kiếm tập nghiệm Pareto, đảm bảo sự cân bằng giữa các mục tiêu mâu thuẫn như giảm khối lượng, hạn chế chuyển vị và tối ưu chiều cao công trình. Việc so sánh các phương pháp này cho phép khảo sát hiệu quả của những chiến lược tìm kiếm và tối ưu hóa khác nhau trong bài toán thiết kế kết cấu đa mục tiêu

2.4. Phương pháp đánh giá

Để đánh giá hiệu quả của các thuật toán metaheuristic trong bài toán tối ưu kết cấu mái lưới thép nhịp lớn, nghiên cứu sử dụng ba tiêu chí chính: giá trị tối ưu, tốc độ hội tụ và độ phân tán kết quả. Các tiêu chí này lần lượt phản ánh chất lượng nghiệm thu được, khả năng đạt nghiệm tối ưu trong thời gian tính toán và mức độ đa dạng của tập nghiệm Pareto. Nhờ đó, có thể đánh giá toàn diện hiệu suất và độ tin cậy của từng thuật toán trong quá trình tối ưu hóa.

Để đánh giá hiệu quả các thuật toán tối ưu, nghiên cứu sử dụng các tiêu chí: HV (Hypervolume), SP (Spacing), thời gian chạy, cùng với giá trị trung bình và phương sai của kết quả.

HV (Hypervolume): đánh giá chất lượng và mức độ bao phủ của tập nghiệm Pareto, chỉ số HV định lượng mức độ hội tụ và tính đa dạng của tập nghiệm A; một thuật toán tốt hơn thường cho giá trị HV lớn hơn, được trình bày như sau.

$$HV = \text{volume}\left(\bigcup_{i=1}^{A} v_i\right) \quad (5)$$

SP (Spacing): phản ánh độ phân bố đều của các nghiệm trên biên Pareto, P_f. Giá trị SP càng nhỏ thì sự phân bố các nghiệm càng đồng đều và tốt hơn, được trình bày như sau:

$$SP = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\bar{d} - d_i\right)^2} \quad (6)$$

Trong đó:

$$d_i = \min_{\substack{k \in P_s \\ k \ne i}} \sum_{m=1}^{M} \left|f_m^i - f_m^k\right| \quad (7)$$

$\bar{d}$ là giá trị trung bình của tất cả các d_i; n là số lượng nghiệm không trội (non-dominated) thu được; và SP là độ lệch chuẩn của khoảng cách giữa các cặp nghiệm liên tiếp trong tập

Thời gian phân tích: thể hiện hiệu quả tính toán và tốc độ hội tụ của thuật toán. Trung bình và phương sai: được tính qua nhiều lần chạy nhằm đánh giá độ ổn định và độ tin cậy của kết quả. Các tiêu chí này cho phép so sánh toàn diện giữa các thuật toán về cả chất lượng nghiệm và hiệu suất tính toán.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TỐI ƯU HÓA

Mục tiêu của bài toán là tối thiểu hóa tổng khối lượng kết cấu mái lưới/vòm thép trong khi vẫn đảm bảo các điều kiện ràng buộc về khả năng chịu lực và khai thác [1]. Các ràng buộc bao gồm: giới hạn ứng suất, điều kiện ổn định tổng thể và cục bộ, kiểm tra độ mảnh cấu kiện và giới hạn chuyển vị tại các nút đặc trưng (đỉnh mái).

Mô hình kết cấu được xây dựng với 3714 phần tử thanh, được chia thành 5 nhóm tiết diện nhằm giảm số lượng biến thiết kế. Các

biến thiết kế là diện tích tiết diện của từng nhóm thanh. Hàm mục tiêu được xác định là tổng khối lượng kết cấu có xét đến hàm phạt khi vi phạm ràng buộc:

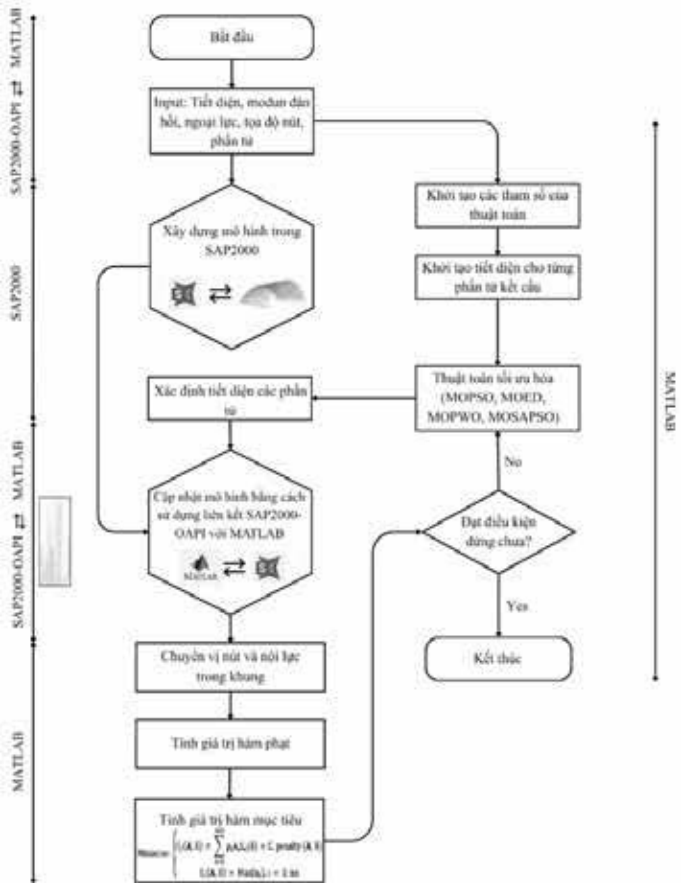
$$\text{Minimize: } \begin{cases} f_1(\mathbf{A},\delta) = \sum_{i=1}^{nm} \rho_i A_i L_i(\delta) + C.\,\text{penalty}\,(\mathbf{A},\delta) \\ f_2(\mathbf{A},\delta) = \text{Max}\{u_i\}, i = 1{:}\,nn \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} A_{i,min} \le A_i \le A_{i,max}, \;\; i = 1 \ldots nm \\ \delta_{min} \le \delta \le \delta_{max} \end{cases}$$

Trong đó A_i là diện tích tiết diện nhóm thanh, L_i là tổng chiều dài, ρ_i là khối lượng riêng và C là hệ số phạt, nm là số phần tử, u_i là chuyển vị của các nút, nn là số nút, δ là biến chiều cao mái; δ_{min} và δ_{max} là giới hạn chiều cao hình học của mái.

Khi giải bài toán đa mục tiêu, tập nghiệm Pareto Front thu được sẽ cho ra các cặp giá trị (f_1, f_2) tương ứng với từng giá trị chiều cao δ và tiết điện của kết cấu tối ưu. Từ tập nghiệm Pareto này sẽ xác định được chiều cao công trình hợp lý nhất cân bằng giữa khối lượng và chuyển vị. Các thông số của thuật toán tối ưu được thiết lập như sau: quy mô quần thể N_{pop} là 20 cá thể, số vòng lặp tối đa Max_{iter} đạt 50 lần cho mỗi lần chạy. Các thuật toán được đánh giá 15 lần độc lập để so sánh khả năng giải tối ưu.

Quy trình tối ưu được thực hiện bằng cách tích hợp SAP2000 và MATLAB thông qua giao diện OAPI [2, 4], trong đó thuật toán tối ưu liên tục tạo và cập nhật các phương án thiết kế trong SAP2000, thực hiện phân tích phần tử hữu hạn (FEM), kiểm tra các điều kiện ràng buộc và đánh giá hàm mục tiêu, kết quả được đưa về MATLAB tính giá trị hàm mục tiêu và xử lý các ràng buộc thông qua hàm phạt. Quá trình này được lặp lại cho đến khi đạt điều kiện hội tụ, từ đó xác định tập nghiệm Pareto tối ưu, như minh họa trong Hình 1 và 2.



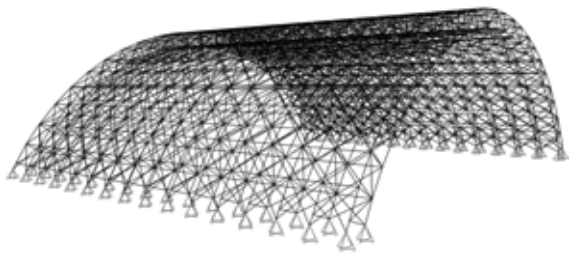
Hình 1. Mô hình tích hợp SAP2000-OAPI với thuật toán tối ưu trong phân tích kết cấu


Hình 2. Mã kết nối SAP2000-OAPI và MATLAB

4. ÁP DỤNG TRONG KẾT CẤU CÔNG TRÌNH CHO MÁI VÒM KHÔNG GIAN

4.1. Kết cấu mái vòm

Mô hình nghiên cứu là mái vòm không gian gồm 3714 thanh (Hình 3, Bảng 1), sử dụng thép ống tròn theo tiêu chuẩn ASTM A992, cấp Fy50, với 37 tiết diện được lựa chọn theo AISC-LRFD. Kết cấu thuộc dạng mái vòm trụ, có khẩu độ 111.3 m và chiều cao ban đầu 34.5 m, đảm bảo khả năng chịu lực và ổn định tổng thể.


Hình 3. Mô hình mái vòm trong SAP2000

Toàn bộ hệ thanh được phân thành 5 nhóm tiết diện, đóng vai trò là các biến thiết kế trong bài toán tối ưu, và được trình bày trong Bảng 1. Mô hình này đại diện cho dạng kết cấu mái nhịp lớn có độ phức tạp cao, thường được ứng dụng trong các công trình quy mô lớn, yêu cầu không gian rộng và phân bố tải trọng hợp lý.

Bảng 1. Nhóm biến và phần tử

Nhóm biến	Ký hiệu	Phần tử	Số lượng	Vị trí
X1	A1	1 → 800	800	Thanh cánh trên
X2	A2	801 → 1200	400	Thanh cánh dưới
X3	A3	1201 → 1584	384	Thanh giằng xiên
X4	A4	1585 → 2274	690	Thanh giằng đứng
X5	A5	2275 → 3714	1440	Thanh giằng X
X6	δ	1 → 835	835	Cao độ nút mái

4.2. Tải trọng tác dụng

Theo TCVN 2737:2023 [6] tải trọng tác dụng lên công trình gồm Tải trọng bản thân (SW), Hoạt tải (LL), Tải trọng gió (WL). Giá trị tiêu chuẩn của tải trọng gió được xác định bằng công thức sau:

$$W_k = W_{3s,10}.\,k(z_e).\,c.\,G_f \quad (9)$$

Trong đó: $W_{3s,10}$ là áp lực gió 3s ứng với chu kỳ lặp 10 năm; $W_{3s,10} = 0.852W_0$; $k_{(ze)}$ là hệ số kể đến sự thay đổi áp lực gió theo độ cao và dạng địa hình tại độ cao tương đương z_e; c là hệ số khí động; G_f là hệ số hiệu ứng giật.

Tổ hợp tải trọng được tổ hợp theo công thức sau:

$$C_m = \gamma_n \left(\sum_{i\ge1} \gamma_{f,i} G_{k,i} + \sum_{j\ge1} \gamma_{f,j} \psi_{L,j} Q_{k,L,j} + \sum_{m\ge1} \gamma_{f,m} \psi_{t,m} G_{k,t,m} \right) \quad (10)$$

Các hệ số trong mục 6.2 theo TCVN 2737:2023 [6].

Tổ hợp tải trọng khi thiết kế theo trạng thái giới hạn thứ 1 và thứ 2 được mô tả trong bảng 2.

Bảng 2. Tổ hợp tải trọng kiểm tra theo trạng thái giới hạn thứ 1 và thứ 2

Combo	SW	LL	WX	WY
ULS1	1,05	1,3	-	-
ULS2	1,05	-	2,1	-
ULS3	1,05	-	-2,1	-
ULS4	1,05	-	-	2,1
ULS5	1,05	-	-	-2,1
ULS6	1,05	1,3	1,89	-
ULS7	1,05	1,3	-1,89	-
ULS8	1,05	1,3	-	1,89
ULS9	1,05	1,3	-	-1,89
ULS10	1,05	1,17	2,1	-
ULS11	1,05	1,17	-2,1	-
ULS12	1,05	1,17	-	2,1
ULS13	1,05	1,17	-	-2,1
SLS1	1,00	1,00	-	-
SLS2	1,00	-	1,00	-
SLS3	1,00	-	-1,00	-
SLS4	1,00	-	-	1,00
SLS5	1,00	-	-	-1,00
SLS6	1,00	1,00	0,90	-
SLS7	1,00	1,00	-0,90	-
SLS8	1,00	1,00	-	0,90
SLS9	1,00	1,00	-	-0,90
SLS10	1,00	0,90	1,00	-
SLS11	1,00	0,90	-1,00	-
SLS12	1,00	0,90	-	1,00
SLS13	1,00	0,90	-	-1,00

Trong đó: ULS là trạng thái giới hạn 1; SLS là trạng thái giới hạn 2

4.3. Kết quả

4.3.1. Kết quả của các thuật toán

Kết quả thống kê HV và thời gian tính toán, và SP được trình bày tại Bảng 3 và Bảng 4 cho thấy sự khác biệt về chất lượng nghiệm và hiệu quả tính toán giữa các thuật toán. Kết quả giải pháp tốt nhất mỗi thuật toán được trình bày tại Bảng 5 và Bảng 6.

Bảng 3. Thống kê kết quả HV

STT	Thuật toán	Lớn nhất	Nhỏ nhất	Trung bình	Phương sai	CPU time (s)
1	MOPSO	0,116359	0,061722	0,077777	$2{,}281\times10^{-4}$	3267,58
2	MOED	0,117379	0,115941	0,116630	$1{,}518\times10^{-7}$	28407,47
3	MOPWO	0,117160	0,109421	0,114154	$7{,}139\times10^{-6}$	56363,32
4	MOSAPSO	0,070598	0,015158	0,035769	$2{,}833\times10^{-4}$	55791,56

Bảng 4. Thống kê kết quả SP

STT	Thuật toán	Lớn nhất	Nhỏ nhất	Trung bình	Phương sai
1	MOPSO	1525,522	0,000	101,701	$1{,}551\times10^{5}$
2	MOED	2265,632	1431,612	1762,045	45494,782
3	MOPWO	10475,045	1546,968	2841,030	$4{,}478\times10^{6}$
4	MOSAPSO	9270,534	1020,205	2839,285	$4{,}134\times10^{6}$

Bảng 5. Kết quả của giải pháp tốt nhất

Biến thiết kế	MOPSO	MOED	MOPWO	MOSAPSO
x1 (A1)	28,6844 (PX6)	27,8718 (P8)	28,9225 (PX6)	29,9927 (PXX5)
x2 (A2)	27,2516 (P8)	27,9409 (P8)	27,0928 (P8)	30,0308 (P10)
x3 (A3)	27,3262 (P8)	27,6972 (P8)	27,4464 (P8)	27,9161 (P8)
x4 (A4)	21,4451 (P5)	21,7158 (P5)	21,6611 (P5)	24,0065 (P6)
x5 (A5)	10,7514 (P2)	10,7710 (P2)	10,5833 (P2)	16,1811 (P3.5)
x6 (δ)	0,4347 (mm)	-0,0812 (mm)	0,3449 (mm)	0,4899 (mm)

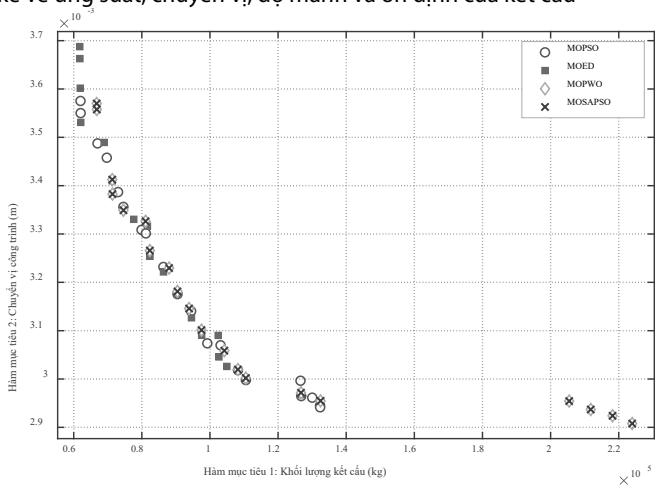
Bảng 6. Giá trị hàm mục tiêu tương ứng

Thuật toán	Objective 1 nhỏ nhất (kg)	Objective 2 tương ứng (m)
MOPSO	61988,69	0,00357521
MOED	61189,41	0,00445424
MOPWO	61784,23	0,00368282
MOSAPSO	75565,95	0,00351155

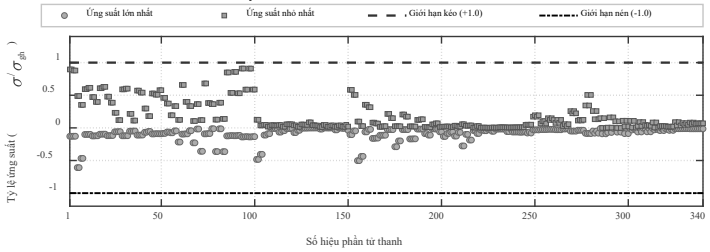
Kết quả cho thấy MOED có hiệu quả tổng thể tốt nhất trong bốn thuật toán được khảo sát. MOED đạt giá trị HV trung bình 0,116630, cao nhất, với phương sai chỉ $1{,}518\times10^{-7}$, thể hiện khả năng hội tụ tốt và ổn định. Chỉ số SP trung bình đạt 1762.045, thấp hơn MOPWO và MOSAPSO, cho thấy sự phân bố nghiệm Pareto tương đối đồng đều. Về thời gian tính toán, MOED có giá trị trung bình 28407,47s, thấp hơn đáng kể so với MOSAPSO và MOPWO. Ngoài ra, MOED tìm được giá trị Objective 1 nhỏ nhất 61189,41 kg, cho thấy khả năng tìm kiếm phương án có giá trị mục tiêu thấp hiệu quả. Do đó, MOED có ưu thế đồng thời về chất lượng nghiệm, độ ổn định, khả năng phân bố nghiệm và thời gian tính toán, nên MOED được lựa chọn làm thuật toán tối ưu chính cho các phân tích tiếp theo của nghiên cứu.

4.3.2. Kiểm tra trường hợp điển hình

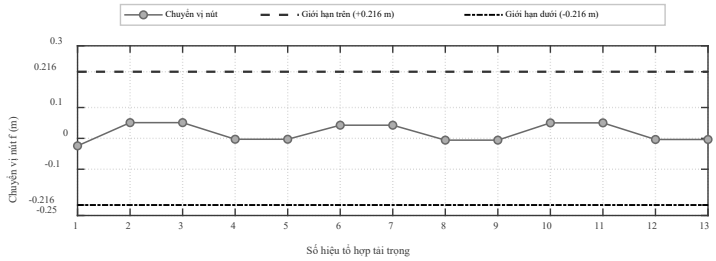
Hình 4 trình bày các đường Pareto front tốt nhất thu được từ bốn thuật toán MOSAPSO, MOED, MOPWO và MOSAPSO. Kết quả kiểm tra các điều kiện ràng buộc đối với nghiệm có giá trị hàm mục tiêu f_1 nhỏ nhất của thuật toán MOED được trình bày trong Hình 5 - 8. Các kết quả cho thấy nghiệm này đáp ứng đầy đủ các yêu cầu thiết kế về ứng suất, chuyển vị, độ mảnh và ổn định của kết cấu



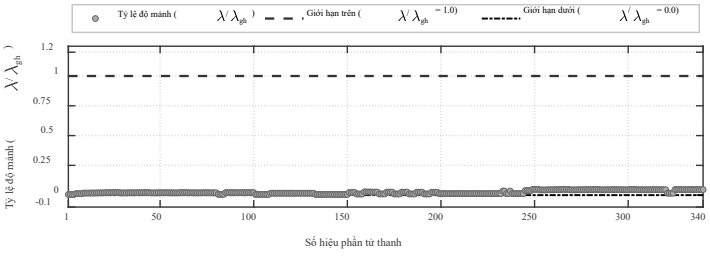
Hình 4. Biểu đồ tập nghiệm Pareto-front so sánh giữa 4 thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu



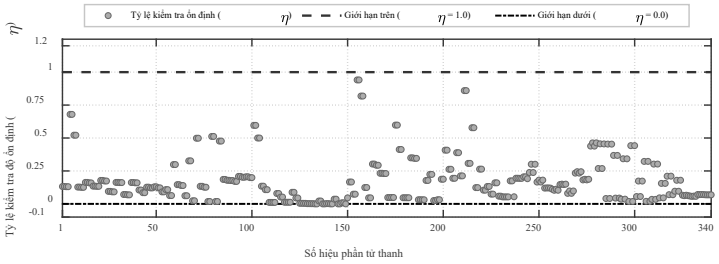
Hình 5. Biểu đồ ứng suất của thuật toán MOED



Hình 6. Biểu đồ chuyển vị của thuật toán MOED



Hình 7. Biểu đồ độ mảnh của thuật toán MOED



Hình 8. Biểu đồ ổn định của thuật toán MOED

4.3.3. So sánh với các dự án tương đồng

Để đánh giá mức độ tiết kiệm của phương án tối ưu, một số dự án (A, B và C) được thu thập và so sánh như trong Bảng 7. Kết quả cho thấy rằng phương án của nghiên cứu này tiết kiệm hơn từ 34,84% đến 79,99% trên suất đầu tư.

Bảng 7. Bảng so sánh dự án thu thập và dự án nghiên cứu

Tên dự án	Diện tích (m^2)	Tổng khối lượng kết cấu (tấn)	Suất khối lượng (kg/m^2)	Mức độ giảm khối lượng
Dự án A	16380 m^2	4000 Tấn	244,20 kg/m^2	79,99%
Dự án B	50000 m^2	4500 Tấn	90,00 kg/m^2	45,70%
Dự án C	15000 m^2	1125 Tấn	75,00 kg/m^2	34,84%
Dự án đang nghiên cứu	10017 m^2	489,52 Tấn	48,87 kg/m^2	-

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và áp dụng thành công quy trình tối ưu hóa đa mục tiêu cho kết cấu mái vòm lưới thép nhịp lớn, dựa trên mô hình tích hợp SAP2000-OAPI với MATLAB việc sử dụng các thuật toán tối ưu đa mục tiêu: MOPSO, MOED, MOPWO và MOSAPSO. Trong đó, bài toán tập trung vào các hàm mục tiêu là trọng lượng, cao trình và độ cứng kết cấu với các biến là tiết diện kết cấu và chiều cao của kết cấu. Phương pháp đề xuất cho phép tự động quá trình thay đổi biến thiết kế, phân tích kết cấu, kiểm tra các điều kiện ràng buộc và tìm kiếm tập nghiệm Pareto front.

Kết quả thống kê cho thấy các thuật toán đều có khả năng giải bài toán tối ưu đa mục tiêu, tuy nhiên hiệu quả và độ ổn định có sự khác biệt. Trong đó, MOED đạt giá trị HV trung bình cao nhất là 0.116630, đồng thời có phương sai HV nhỏ, thể hiện khả năng hội tụ tốt và kết quả ổn định qua các lần chạy. Giá trị SP trung bình của MOED là 1762,045, cho thấy tập nghiệm Pareto có mức độ phân bố tương đối đồng đều. Bên cạnh đó, MOED có thời gian tính toán trung bình 28407,47s, thấp hơn so với MOPWO và MOSAPSO.

Đáng chú ý, MOED tìm được phương án có giá trị Objective 1 nhỏ nhất, tương ứng khối lượng kết cấu là 61189,41 kg, trong khi vẫn đảm bảo các điều kiện về bền, ổn định, độ mảnh và chuyển vị. Kết quả kiểm tra phương án tối ưu của MOED cho thấy các chỉ tiêu đáp ứng giới hạn thiết kế đặt ra.

Từ các kết quả trên, MOED được đánh giá là thuật toán có hiệu quả tổng thể tốt nhất trong phạm vi nghiên cứu, xét đồng thời chất lượng nghiệm, độ ổn định, khả năng phân bố nghiệm và thời gian tính toán. Do đó, MOED được lựa chọn để thực hiện các phân tích và đánh giá chuyên sâu tiếp theo đối với kết cấu mái vòm lưới thép nhịp lớn.

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc kết hợp SAP2000-OAPI với thuật toán tối ưu đa mục tiêu có tiềm năng nâng cao hiệu quả và mức độ tự động hóa trong thiết kế kết cấu nhịp lớn, đồng thời hỗ trợ kỹ sư lựa chọn phương án thiết kế cân bằng giữa yêu cầu về khối lượng, độ cứng và khả năng làm việc của công trình.

Nghiên cứu tiếp theo tiếp tục khảo sát và phân tích chi tiết ảnh hưởng của các hệ số điều khiển, cơ chế tìm kiếm cục bộ và toàn cục đến tốc độ cũng như độ hội tụ của các thuật toán metaheuristic (đặc biệt là việc tối ưu hóa thời gian chạy cho các thuật toán có cấu trúc phức tạp như MOPWO và MOSAPSO). Bên cạnh đó, mô hình tích hợp sẽ được mở rộng để áp dụng cho các dạng kết cấu không gian phức tạp hơn dưới tác động của các loại tải trọng động hoặc tải trọng đặc biệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Kaveh and M. Ghazaan. Optimal Design of Double-Layer Grids, pp. 65-83, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-78780-0_5.

[2] K. Özgan, V. Kahya and S. Şimşek. Damage assessment of truss structures via finite element model update using a combined TLBO-SAP2000 OAPI approach, 2024, doi: 10.21203/rs.3.rs-4707670/v1.

[3] A. Kaveh and S. M. Hosseini. Design optimization of cable-equipped barrel vault structures using improved shuffled based Jaya algorithm. Advances in Engineering Software, vol. 176, p.103406, 2023, doi: 10.1016/j.advengsoft.2022.103406.

[4] D. Dinh-Cong, T. Nguyen-Thoi and D. T. Nguyen. 'A FE model updating technique based on SAP2000-OAPI and enhanced SOS algorithm for damage assessment of full-scale structures.' Applied Soft Computing, vol. 89, p. 106100, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106100.

[5] Bộ Xây dựng. TCVN 5575:2024 -Thiết kế kết cấu thép. NXB. Xây dựng, 2024.

[6] Bộ Xây dựng. TCVN 2737: 2023 - Tải trọng và tác động. NXB. Xây dựng, 2023.

[7] R. E. Perez and K. Behdinan. Particle swarm approach for structural design optimization.' Computers & Structures, vol. 85, no. 19, pp. 1579-1588, 2007, doi: 10.1016/j.compstruc.2006.10.013.

[8] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995, doi: https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968.

[9] D.-N. Truong and J.-S. Chou. Multiobjective enterprise development algorithm for optimizing structural design by weight and displacement. Applied Mathematical Modelling, vol. 137, 2025, Art. no. 115676, doi: 10.1016/j.apm.2024.115676.

[10] J.-S. Chou, C.-Y. Liu and D.-N. Truong. Multiobjective pilgrimage walk optimization to enhance finite element analysis of double-layer barrel vaults and grid roofs. Journal of Building Engineering, vol. 120, p. 115190, 2026, doi: 10.1016/j.jobe.2026.115190.

[11] D.-N. Truong and J.-S. Chou. Multi-objective scientific approach to problem solving-inspired optimization integrated with the finite element method for automated structural design. Automation in Construction, vol. 183, no. 106770, art. 2026, doi: 10.1016/j.autcon.2026.106770.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Nghiên cứu ảnh hưởng chiều dài nhịp chính và số lượng tháp đến chiều cao hiệu dụng của tháp cầu dây văng dầm liên hợp

Effect of main span length and number of pylons on the effective pylon height of composite cable-stayed bridges

> THS HỒ THÁI HÙNG[1], GS.TS NGUYỄN TRUNG VIỆT[2], PGS.TS NGÔ TRÍ THƯỜNG[2,*]
[1]Công ty TNHH Chodai & Kiso-Jiban Việt Nam
[2]Trường Đại học Thủy lợi
[*]Email: trithuong@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Tỷ lệ giữa chiều cao tháp hiệu dụng ($H_{t,eff}$) và chiều dài nhịp chính (L_{main}) là một trong các thông số chi phối góc nghiêng cáp (α) và độ cứng tổng thể của cầu dây văng dầm liên hợp (Composite Cable-Stayed Bridge, CCSB), nhưng trong thiết kế sơ bộ thường được chọn theo tỷ số kinh nghiệm cố định ($H_{t,eff}$ = 0,16 - 0,25 L_{main}) cho mọi chiều dài nhịp, không phân biệt số lượng tháp. Nghiên cứu phân tích 91 cầu CCSB đã hoàn thành, phân nhóm theo số lượng tháp và thiết lập quan hệ $H_{t,eff}$–L_{main} bằng hồi quy tuyến tính. Với nhóm hai tháp (65 cầu): $H_{t,eff}$ = 0,198·L_{main} + 17,6 (m), R^2 = 0,692, khoảng dự báo 90% rộng 54,5 m. Nhóm một tháp (21 cầu) có hệ số góc 0,441, gấp khoảng 2,2 lần nhóm hai tháp. Đồng thời, chưa có bằng chứng thống kê về ảnh hưởng độc lập của bề rộng cầu, ngoài nhịp chính, đến quan hệ $H_{t,eff}$–L_{main}.

Từ khóa: Cầu dây văng dầm liên hợp (CCSB); chiều cao hiệu dụng tháp; số lượng tháp; nhịp chính; khoảng dự báo; hồi quy tuyến tính.

ABSTRACT

The ratio between effective pylon height ($H_{t,eff}$) and main span length (L_{main}) is one of the parameters governing cable inclination (α) and overall stiffness of composite cable-stayed bridges (CCSB), but in preliminary design it is selected by a fixed empirical ratio ($H_{t,eff}$ = 0.16–0.25 L_{main}) applied across all span lengths, without distinguishing by number of pylons. This study analyses 91 completed CCSB, grouped by number of pylons, and fits the $H_{t,eff}$–L_{main} relationship for each group by linear regression. The twin-pylon group (65 bridges) follows $H_{t,eff}$ = 0.198·L_{main} + 17.6 (m), R^2 = 0.692, with a 90% prediction interval 54.5 m wide; the single-pylon group (21 bridges) has a slope of 0.441, about 2.2 times the twin-pylon slope. In addition, there is no statistical evidence of an independent effect of deck width, beyond main span length, on the $H_{t,eff}$–L_{main} relationship.

Keywords: Composite cable-stayed bridge; effective pylon height; number of pylons; main span; prediction interval; linear regression.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cầu dây văng dầm liên hợp (Composite Cable-Stayed Bridge, CCSB) là giải pháp phổ biến khi thiết kế cầu trong dải nhịp trung bình đến lớn [1]. Chiều cao tháp hiệu dụng ($H_{t,eff}$), tính từ mặt dầm lên đỉnh tháp, là một trong các thông số được lựa chọn đầu tiên khi thiết kế sơ bộ vì chi phối góc nghiêng cáp, lực căng cáp, lực nén dọc trong dầm chủ và độ cứng tổng thể [2]. Hiện nay $H_{t,eff}$ được chọn theo các quy tắc kinh nghiệm [3 - 11], phần lớn lấy $H_{t,eff}$ bằng khoảng 0,16 - 0,25 lần L_{main}; Gimsing và Georgakis [2] chia dải này theo sơ đồ cáp và vật liệu dầm.

Các quy tắc này có một số hạn chế. Thứ nhất, chúng không phân biệt cầu một tháp với cầu hai tháp dù hai cấu hình chịu tải khác nhau; một số nguồn [4, 7, 8, 10] chỉ nêu hệ số quy đổi nhịp cố định 1,6 - 2,0 suy ra từ hình học, chưa kiểm chứng trên công trình thực tế, dù khác biệt về lượng cáp đã được ghi nhận [12], [13]. Thứ hai, chưa có quan hệ hồi quy $H_{t,eff}$–L_{main} nào được kiểm định thống kê trên mẫu đồng nhất về số lượng tháp: các khung tham số hóa [14] chỉ coi $H_{t,eff}$ là tham số cần khởi tạo, còn biểu đồ của Hassan và cộng sự [15] suy ra từ mô phỏng tối ưu hóa. Thứ ba, các quy tắc không kèm khoảng dự báo.

Nghiên cứu đề xuất công thức khởi tạo $H_{t,eff}$ theo L_{main} cho CCSB, kèm khoảng dự báo, với ba mục tiêu: (i) nghiên cứu ảnh hưởng của số lượng tháp đến chiều cao hiệu dụng của tháp; (ii) xây dựng mối tương quan giữa $H_{t,eff}$ và L_{main} cho nhóm tháp khác nhau; (iii) thiết lập khoảng dự báo phản ánh đúng phân bố sai số.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thu thập dữ liệu và biến nghiên cứu

Cơ sở dữ liệu tổng hợp từ tài liệu khoa học, báo cáo kỹ thuật và hồ sơ công trình của các cầu dây văng dầm liên hợp (CCSB). Tiêu chí chọn mẫu: (i) cầu đã hoàn thành, có nguồn truy xuất được; (ii) có đủ hai trường L_{main} và $H_{t,eff}$. Sau sàng lọc còn 91 trong số 111 cầu. $H_{t,eff}$ đo từ mặt dầm lên đỉnh tháp; L_{main} là nhịp lớn nhất của cầu. Cơ sở dữ liệu này cũng là nguồn số liệu của nghiên cứu về chiều cao dầm chủ [16].

Trong nhóm 65 cầu hai tháp, hệ số Pearson giữa $H_{t,eff}$ và 10 trường số của cơ sở dữ liệu lớn nhất ở L_{main} (r = 0,832), rồi đến chiều cao dầm chủ (0,589), tổng số dây cáp (0,530), bề rộng hữu dụng (0,423) và B_{total} (0,411). Ở bước khởi tạo chỉ biết nhịp chính, số lượng tháp và bề rộng cầu; chiều cao dầm chủ và số dây cáp được xác định ở các bước sau, còn bề rộng hữu dụng chỉ có ở 42 trong 65 cầu và gần trùng với B_{total} (r = 0,969). Do đó biến độc lập là L_{main} và B_{total}, biến phụ thuộc là $H_{t,eff}$.

2.2. Phân nhóm mẫu theo số lượng tháp

Gọi V là tải trọng thẳng đứng dồn về một tháp và α là góc nghiêng cáp so với phương ngang; lực căng cáp T và lực nén dọc trong dầm chủ F_{girder} được xác định gần đúng bởi

$$T = \frac{V}{\sin\alpha} \quad (1)$$

$$F_{girder} \approx V \cdot \cot\alpha \approx \frac{V \cdot L_{main}}{2H_{t,eff}} \quad (2)$$

Với dây văng xa tháp nhất, tan $\alpha = H_{t,eff}/(L_{main}/2)$, nên cả hai công thức phụ thuộc trực tiếp vào $H_{t,eff}$. Theo Gimsing và Georgakis [2], khối lượng cáp nhỏ nhất khi α = 45°; khi tính thêm chi phí vật liệu tháp, góc tối ưu giảm xuống α = 30°, và dưới 30° dây cáp được sử dụng kém hiệu quả hơn.

Với cùng nhịp chính, cầu một tháp dồn tải của cả hai nhịp vào một tháp, còn cầu hai tháp chia cho hai tháp, nên V lớn hơn. Muốn giữ T và F_{girder} trong giới hạn thì phải giữ α đủ lớn, tức tăng $H_{t,eff}$, nghĩa là ở cùng nhịp, cầu một tháp cần có tháp cao hơn.

Từ đó, 91 cầu được chia thành 65 cầu hai tháp ba nhịp (một nhịp chính, hai nhịp biên; trụ trung gian chỉ chia nhịp biên nên không đổi cách gọi), 21 cầu một tháp hai nhịp và năm cầu đa tháp (từ ba tháp trở lên). Năm cầu đa tháp nằm ngoài phạm vi so sánh do đặc thù kết cấu và cỡ mẫu. Về kết cấu, tháp trung gian của cầu nhiều tháp không có dây neo nối tới điểm cố định theo phương đứng ở cao độ mặt cầu, nên phải có độ cứng uốn lớn để chịu chênh lệch lực cáp khi hoạt tải chỉ đặt ở một trong hai nhịp kề tháp [2], tức phân bố nội lực khác với cầu một và hai tháp. Về thống kê, năm cầu (L_{main} = 231–616 m) chỉ còn ba bậc tự do sau khi ước lượng hai tham số của đường thẳng, không đủ để kiểm định phân phối phần dư hoặc lập khoảng dự báo tin cậy. Vì vậy ảnh hưởng của số lượng tháp chỉ được xét ở hai mức (một và hai tháp).

Giả thuyết hai nhóm có hai quan hệ $H_{t,eff}$–L_{main} khác nhau được đánh giá trên 86 cầu (65 hai tháp và 21 một tháp) bằng mô hình có số hạng tương tác $H_{t,eff} = a \cdot L_{main} + b + \Delta b \cdot G + \Delta a \cdot (L_{main} \cdot G)$, với G là biến giả bằng 1 cho nhóm một tháp, so với một mô hình hồi quy chung, qua kiểm định F riêng phần (dạng tuyến tính vì chỉ cần xét có tách nhóm hay không). Nếu việc phân nhóm cần thiết (Mục 3.1), các bước sau chỉ áp dụng cho nhóm trọng tâm gồm 65 cầu hai tháp.

2.3. Lựa chọn biến giải thích và dạng hàm

Trong 86 cầu hai nhóm, 81 cầu có đủ thông số bề rộng cầu (B_{total}). Vai trò của B_{total} bên cạnh L_{main} được đánh giá trên ba tập: mẫu gộp hai nhóm (n = 81), nhóm hai tháp (n = 62) và nhóm một tháp (n = 19), qua ba bước: (1) hệ số Pearson giữa L_{main} và B_{total} để kiểm tra đa cộng tuyến; (2) phép thử hoán vị, xáo trộn ngẫu nhiên B_{total} 1.000 lần, so mức tăng R^2 thực khi thêm B_{total} với mức tăng ngẫu nhiên; (3) kiểm định chéo bỏ-một (LOOCV, Leave-One-Out Cross-Validation) [17], so sai số dự báo ngoài mẫu của mô hình một và hai biến.

Bốn dạng hàm được so sánh: tuyến tính ($H_{t,eff} = a \cdot L_{main} + b$), lũy thừa ($H_{t,eff} = k \cdot {L_{main}}^{m}$), bậc hai ($H_{t,eff} = c_2 \cdot {L_{main}}^{2} + c_1 \cdot L_{main} + c_0$) và mô hình cộng tính tổng quát (GAM, Generalized Additive Model) [18]. Tiêu chí quyết định là LOOCV-RMSE, với RMSE (Root Mean Square Error) là căn bậc hai của trung bình bình phương sai số, cùng đơn vị mét với $H_{t,eff}$.

2.4. Ước lượng tham số, khoảng tin cậy và khoảng dự báo

Mô hình tuyến tính đã chọn được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu thông thường (OLS), kèm sai số chuẩn và p-value của từng hệ số. Mô hình có hằng số được so với mô hình ép qua gốc tọa độ ($H_{t,eff} = a \cdot L_{main}$) bằng LOOCV-RMSE để kiểm tra ràng buộc $H_{t,eff}$ = 0 khi L_{main} = 0. Phần dư được chẩn đoán bằng độ lệch, kiểm định Shapiro–Wilk (tính chuẩn) và Levene [19] (đồng nhất phương sai, trên ba nhóm chia theo tam phân vị của L_{main}) để xác nhận các giả thiết của OLS.

Khoảng tin cậy 95% của tham số dùng bootstrap [20] (lấy mẫu có hoàn lại theo từng cầu, 10.000 lần). Khoảng tin cậy 95% của đường hồi quy trung bình tính theo $\hat{y} \pm t \cdot \mathrm{SE}(\hat{y})$, với SE là sai số chuẩn của giá trị trung bình dự báo và t là phân vị 97,5% của phân phối t với $n - 2$ bậc tự do; khác khoảng dự báo 90% cho một cầu riêng lẻ.

Phân phối phần dư được kiểm tra bằng cách khớp phân phối chuẩn, Gamma tịnh tiến và chuẩn lệch bằng ước lượng hợp lý cực đại (MLE), so sánh bằng kiểm định Kolmogorov–Smirnov (KS) và tiêu chí thông tin Akaike [21] (AIC, giá trị càng thấp càng tốt). Khoảng dự báo 90% cộng phân vị 5% và 95% của phân phối đã khớp vào giá trị dự báo.

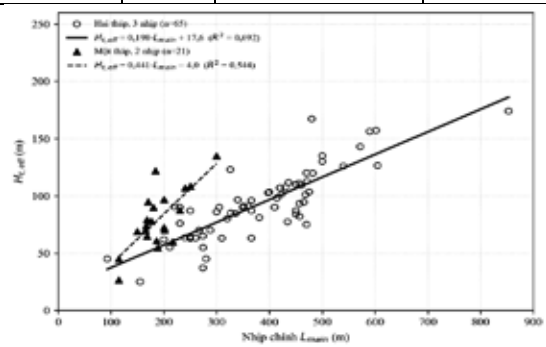
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Cơ sở dữ liệu và kiểm định phân nhóm theo số lượng tháp

Mẫu 91 cầu gồm ba nhóm cấu hình tháp (Bảng 1): nhóm hai tháp (n = 65) là trọng tâm, nhóm một tháp (n = 21) là nhóm phụ. Năm cầu đa tháp không được phân tích (Mục 2.2).

Bảng 1. Ba nhóm cấu hình tháp trong mẫu 91 cầu CCSB

Nhóm	n	L_{main} (m): min–max	$H_{t,eff}$ (m): min–max
2 tháp 3 nhịp	65	93 – 853	25 – 174
1 tháp 2 nhịp	21	115 – 300	26,6 – 135
≥ 3 tháp	5	231 – 616	74 – 140
Tổng	91	93 – 853	25 – 174



Hình 1. Hai đường hồi quy riêng biệt cho nhóm hai tháp ba nhịp và nhóm một tháp hai nhịp

Mô hình tương tác trên 86 cầu cho hệ số tương tác Δa = 0,244 (p = 0,009), là mức chênh lệch hệ số góc L_{main}–$H_{t,eff}$ giữa hai nhóm; kiểm định F riêng phần so với mô hình một đường hồi quy chung

cho F(2, 82) = 15,54, $p < 0,0001$. Tách hai đường hồi quy nâng R^2 từ 0,556 lên 0,678; R^2 riêng là 0,692 (hai tháp) và 0,544 (một tháp) (Hình 1). Do đó, việc gộp hai nhóm vào một mô hình là không phù hợp về thống kê và kết cấu (Mục 2.2).

3.2. Vai trò của bề rộng cầu (B_{total}) trong nhóm hai tháp (nhóm trọng tâm)

Phép thử hoán vị (Bảng 2) cho thấy không đủ bằng chứng rằng mức tăng R^2 khi thêm B_{total} lớn hơn mức tăng ngẫu nhiên ở cả ba tập. Ở nhóm một tháp, $p = 0,051$ sát ngưỡng 0,05 ($\Delta R^2 = 0,102$) nhưng cỡ mẫu nhỏ ($n = 19$) làm ước lượng kém ổn định, nên chỉ kết luận được là chưa có bằng chứng thống kê, chứ không thể khẳng định bề rộng cầu không ảnh hưởng. LOOCV-RMSE cũng tăng khi thêm B_{total}. Nguyên nhân là L_{main} và B_{total} tương quan khá chặt ($r = 0,438$ ở mẫu gộp, 0,510 ở nhóm hai tháp, 0,238 ở nhóm một tháp): cầu nhịp dài thường rộng hơn, nên thông tin của B_{total} phần lớn đã trùng với L_{main}. B_{total} vì vậy chưa cho thấy bằng chứng giải thích độc lập thêm cho $H_{t,eff}$ ngoài phần L_{main} đã giải thích, và không được xét đến trong mô hình cuối.

3.3. So sánh dạng hàm hồi quy

Bốn dạng hàm được so sánh theo LOOCV-RMSE. Hàm tuyến tính (17,1 m) và lũy thừa (17,4 m) gần như tương đương; hàm bậc hai kém rõ rệt (18,4 m) do quá khớp; GAM cho kết quả bằng hàm tuyến tính (17,1 m) vì đường cong trơn đã hội tụ về một đường thẳng (EDoF = 2,00). Mô hình tuyến tính được chọn vì đơn giản nhất.

3.4. Phương trình hồi quy chính và kiểm tra giả thuyết mô hình đi qua gốc tọa độ

Phương trình hồi quy chính, ước lượng bằng OLS trên nhóm trọng tâm ($n = 65$):

$$H_{t,eff} = 0,198 \cdot L_{main} + 17,6 \quad (m) \qquad (3)$$

Mô hình (3) có $R^2 = 0,692$. Hệ số góc $a = 0,198$ (sai số chuẩn 0,0166; $p < 0,0001$; bootstrap 95%: 0,167 - 0,235) và hằng số $b = 17,6$ m (sai số chuẩn 6,68 m; $p = 0,011$; bootstrap 95%: 3,3 - 29,5 m) đều có khoảng tin cậy không chứa giá trị 0.

Để kiểm tra có nên chuyển tỷ lệ chiều cao trên nhịp thành hằng số hay không, mô hình (3) được so với mô hình ép qua gốc tọa độ (4) bằng LOOCV-RMSE:

$$H_{t,eff} = 0,239 \cdot L_{main} \quad (m) \qquad (4)$$

Mô hình (3) có LOOCV-RMSE = 17,1 m ($R^2 = 0,692$), tốt hơn mô hình (4) (LOOCV-RMSE = 17,8 m, $R^2 = 0,658$) khoảng 3,8%, vì trong dải nhịp khảo sát đường hồi quy phù hợp nhất không đi qua gốc (xem Mục 4).

Bảng 2. Kết quả kiểm định vai trò của B_{total} trên ba tập dữ liệu

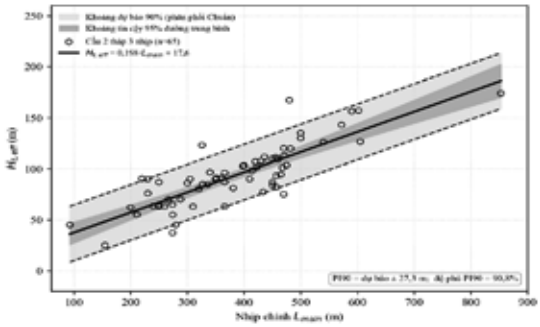
Tập dữ liệu	*p* (phép thử hoán vị)	ΔR^2 thực	LOOCV-RMSE một biến / hai biến (m)
Mẫu gộp hai nhóm ($n = 81$)	0,155	0,012	20,0 / 20,3
Nhóm hai tháp ($n = 62$)	0,707	0,001	16,5 / 17,1
Nhóm một tháp ($n = 19$)	0,051	0,102	19,2 / 19,9

3.5 Ph.ần dư - phân phối và khoảng dự báo

Phần dư của mô hình (3) lệch phải nhẹ (skewness = 0,377) và không bác bỏ được phân phối Chuẩn ở mức 0,05 (Shapiro–Wilk $W = 0,971$, $p = 0,126$). Kiểm định Levene trên ba vùng tam phân vị của L_{main} cho $p = 0,356$, và độ lớn phần dư tuyệt đối không tăng theo nhịp (Spearman $\rho = 0,09$; $p = 0,45$), nên khoảng dự báo cộng phân vị cố định phù hợp trên toàn dải nhịp. AIC (553,4 - 554,5) và KS ($p = 0,705$–$0,755$; thiên cao vì tham số ước lượng từ chính mẫu) không phân biệt được ba phân phối, bề rộng khoảng dự báo 90% gần như không đổi (54,3 m so với 54,5 m); phân phối Chuẩn được chọn vì đơn giản nhất. Khoảng dự báo 90% cho một cầu ($\pm 1,645\sigma$, $\sigma = 16,6$ m) thể hiện trong công thức (5):

$$H_{t,eff,PI90}(L_{main}) = (0,198 \cdot L_{main} + 17,6) \pm 27,3 \qquad (5)$$

Độ phủ thực tế trong mẫu là 90,8% (59/65 cầu), sát mức danh nghĩa 90% (Bảng 3, Hình 2). Độ phủ ngoài mẫu theo LOOCV là 89,2% (58/65 cầu).



Hình 2. Đường dự báo với khoảng tin cậy 95% và khoảng dự báo 90%

Bảng 3. Chiều cao tháp hiệu dụng dự báo và khoảng dự báo 90%, nhóm hai tháp

L_{main} (m)	$H_{t,eff}$ dự báo (m)	Khoảng dự báo 90% (m)	$H_{t,eff}/L_{main}$
150	47,2	20,0 - 74,5	0,31
350	86,7	59,5 - 114,0	0,25
650	146,0	118,8 - 173,3	0,22

Bề rộng khoảng dự báo 90% không đổi theo L_{main}, bằng 54,5 m, hẹp hơn khoảng 13,5% so với mô hình một đường chung trên toàn mẫu $N = 91$ (63,0 m), nhờ giới hạn về một nhóm đồng nhất. Trong thiết kế sơ bộ, giá trị dự báo từ (3) là điểm khởi tạo, khoảng dự báo cho biên độ dự trù ±27,3 m. Do bề rộng không đổi nên sai số tương đối giảm từ ±58% tại 150 m xuống ±19% tại 650 m..

3.6. Phát hiện bổ sung đối với nhóm cầu một tháp hai nhịp

Kết quả hồi quy riêng cho nhóm một tháp ($n = 21$, Hình 1) là:

$$H_{t,eff} = 0,441 \cdot L_{main} - 4,0 \quad (m) \qquad (6)$$

với $R^2 = 0,544$, LOOCV-RMSE = 18,2 m. Hệ số góc $a = 0,441$ gấp khoảng 2,2 lần nhóm hai tháp ($a = 0,198$), đúng chiều xu hướng ở Mục 2.2, vì khi toàn bộ lực thẳng đứng dồn về một tháp, tháp phải cao lên nhanh hơn theo nhịp để giữ góc nghiêng cáp. Đây là phát hiện sơ bộ, không thay (3) làm công cụ thiết kế chính, vì cỡ mẫu nhỏ ($n = 21$), dải nhịp hẹp (115–300 m) và R^2 thấp.

4. THẢO LUẬN

Hệ số góc của nhóm hai tháp theo công thức (3) ($a = 0,198$; bootstrap 95%: 0,167 - 0,235) nằm trong dải hệ số của Gimsing 0,17 - 0,25 [2], Ohtsuka 0,167 - 0,25 [3], Bhatti và cộng sự 0,16 - 0,2 [4] và giao với dải 0,21 - 0,24 của Miranda [6], phù hợp với các quy tắc kinh nghiệm ở Mục 1.

Cầu một tháp cũng có thể được dự báo bằng công thức (3) với nhịp chính nhân hệ số quy đổi k, tức $H_{t,eff} = 0,198 \cdot k \cdot L_{main} + 17,6$; các tài liệu đề xuất $k = 1,6$–$2,0$. Trên 21 cầu một tháp của mẫu, sai số quân phương nhỏ nhất ở $k = 1,68$ (17,5 m), gần $k = 1,6$ của Svensson [8]; $k = 1,8$ của Leonhardt và Zellner [7] cho 18,1 m, $k = 2,0$ của Bhatti và cộng sự [4] cho 21,3 m.

Việc tách nhóm làm thay đổi cách đọc hằng số. Trên toàn mẫu ($N = 91$), hằng số là +37,1 m do trộn các cấu hình; sau khi tách nhóm, nhóm hai tháp cho +17,6 m ($p = 0,011$) còn nhóm một tháp cho –4,0 m, không khác 0 ($p = 0,825$). Cả hai là giá trị ngoại suy tại $L_{main} = 0$, ngoài dải nhịp khảo sát, nên không phải yêu cầu cấu tạo. Với nhịp trung bình và nhỏ, hằng số 17,6 m làm tỷ số $H_{t,eff}/L_{main} = 0,198 +$

17,6/L_{main} vượt 0,25 khi L_{main} dưới khoảng 335 m (0,31 tại 150 m, Bảng 3), tức cao hơn dải kinh nghiệm 0,16 - 0,25; dưới 150 m chỉ có 1/65 cầu nên kết luận cho nhịp nhỏ còn cần nghiên cứu thêm.

B_{total} chưa cho thấy bằng chứng giải thích độc lập thêm cho $H_{t,eff}$ ngoài L_{main} (Mục 3.2). Điều này không mâu thuẫn với nội dung tỷ lệ chiều cao tháp trên bề rộng cầu không nhỏ hơn 4 của Xiang và cộng sự [11], vì đó là tiêu chí hình dáng, không phải chịu lực.

Các nghiên cứu tối ưu hóa gần đây cũng coi chiều cao tháp là biến thiết kế [22 - [24], kể cả dưới dạng tỷ số chiều cao tháp trên nhịp [23]; ở cầu dây văng hai dầm thép liên hợp, tháp cao hơn làm tăng góc nghiêng cáp và độ cứng hệ, cho phép giảm số cáp và mô men quán tính dầm đến một ngưỡng [24]. Các kết quả này thuộc từng bài toán cụ thể, còn công thức (3) cho giá trị khởi tạo.

Cần lưu ý các giới hạn. Phương trình (3) chỉ áp dụng cho cầu hai tháp ba nhịp, trong dải nhịp 93 - 853 m; khoảng 31% biến thiên chiều cao tháp chưa được giải thích (có thể do chiều cao dầm chủ, sơ đồ cáp, địa chất, thẩm mỹ), và ở dải nhịp 93 - 320 m tỷ số $H_{t,eff}/L_{main}$ phân tán rộng hơn (hệ số biến thiên 31% so với 17%). Công thức (6) cho nhóm một tháp (n = 21, L_{main} = 115 - 300 m, R^2 = 0,544, LOOCV-RMSE = 18,2 m) chỉ mang tính định hướng sơ bộ: chỉ nên dùng trong dải nhịp của mẫu, thận trọng khi ngoại suy và cần bổ sung dữ liệu cầu một tháp trong các nghiên cứu tiếp theo.

Về ứng dụng, công thức (3) và Bảng 3 cho phép khởi tạo $H_{t,eff}$ ở thiết kế sơ bộ cho CCSB hai tháp. Ở bước lập dự án khả thi, nên lấy giá trị dự báo làm phương án cơ sở và dùng cận dưới, cận trên của khoảng dự báo 90% (±27,3 m) để khảo sát độ nhạy (cao độ tháp, chi phí, kiến trúc) trước khi tiến hành các phân tích kết cấu phức tạp.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu rút ra ba kết luận chính:

Thứ nhất, cầu một tháp và cầu hai tháp tuân theo hai quan hệ $H_{t,eff}$–L_{main} khác nhau có ý nghĩa thống kê, không nên gộp chung một mô hình; việc phân nhóm thu hẹp khoảng dự báo 90% xuống 54,5 m (so với 63,0 m nếu dùng một mô hình chung). Ngoài nhịp chính, chưa có bằng chứng thống kê về ảnh hưởng độc lập của bề rộng cầu đến $H_{t,eff}$ (Mục 3.2).

Thứ hai, với nhóm cầu CCSB hai tháp ba nhịp, có thể ứng dụng công thức $H_{t,eff}$ = 0,198·L_{main} + 17,6 (m), R^2 = 0,692, LOOCV-RMSE = 17,1 m, kèm khoảng dự báo (5), làm giá trị khởi tạo ở thiết kế sơ bộ, thay cho tỷ số kinh nghiệm cố định hiện áp dụng chung cho mọi chiều dài nhịp.

Thứ ba, nhóm cầu một tháp (n = 21) có cỡ mẫu nhỏ và dải nhịp hẹp (Mục 3.6), chỉ nên dùng công thức (6) làm tham khảo sơ bộ, và ưu tiên hệ số quy đổi nhịp 1,6 - 1,8 (Mục 4) khi chưa có dữ liệu riêng cho cầu một tháp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. J. Oliveira Pedro and A. J. Reis. Composite cable-stayed bridges: state of the art. Proc. Inst. Civ. Eng. - Bridge Eng., vol. 169, no. BE1, pp. 13-38, 2016, doi: 10.1680/bren.14.00005.

[2] N. J. Gimsing and C. T. Georgakis. Cable Supported Bridges: Concept and Design, 3rd ed. Chichester, UK: Wiley, 2012.

[3] H. Ohtsuka, T. Ohta, and F. Imai. Optimum anchoring for long span cable-stayed bridges. Proc. JSCE Struct. Eng./Earthquake Eng., vol. 1, no. 2, pp. 87-95, Oct. 1984, doi: 10.2208/jscej.1984.350_87.

[4] M. A. Bhatti, S. M. N. Raza and S. D. Rajan. Preliminary optimal design of cable-stayed bridges. Eng. Optim., vol. 8, no. 4, pp. 265-289, 1985, doi: 10.1080/03052158508902493.

[5] M. S. Troitsky. Cable-Stayed Bridges: Theory and Design, 2nd ed. Oxford, UK: BSP Professional Books, 1988.

[6] F. de Miranda. Some basic problems in the design of long span cable-stayed bridges. in Advanced Problems in Bridge Construction, G. Creazza and M. Mele, Eds. Vienna, Austria: Springer-Verlag Wien, pp. 91-120, 1991, doi: 10.1007/978-3-7091-2614-1_6.

[7] F. Leonhardt and W. Zellner. Cable-stayed bridges. IABSE Surveys S-13/80, IABSE Periodica 2/1980, pp. 21-48, 1980.

[8] H. Svensson. Cable-Stayed Bridges: 40 Years of Experience Worldwide. Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2012.

[9] W. Podolny and J. B. Scalzi. Construction and Design of Cable-Stayed Bridges, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1986.

[10] M. Nagai, M. Izawa and H. Nakamura. Basic Planning and Design Method of Cable-Stayed Bridges (斜張橋の基本計画設計法). Tokyo, Japan: Morikita Publishing, 1997.

[11] H. Xiang et al. Conceptual Design of Bridges, 1st Indian ed. New Delhi, India: S. K. Kataria & Sons, 2015 (orig. ed.: Beijing, China: China Communications Press, 2011).

[12] S. Soppela and E. Järvenpää. Conceptual design of balanced cable-stayed bridges. in IABSE Congress, New York, pp. 1887-1891, 2019, doi: 10.2749/NEWYORK.2019.1887.

[13] A. Jutila, E. Järvenpää, and T. T. Quach. Balance and costs of cable-stayed bridges with inclined and curved tower shapes. Struct. Eng. Int., vol. 31, no. 4, pp. 498-503, 2021, doi: 10.1080/10168664.2021.1929666.

[14] J. Romo, A. Boegle and A. Meyboom. Geometry and parametric modeling in the conceptual design of bridges. in Proc. IABSE Conf. Geneva 2015, Geneva, Switzerland, pp. 433-442, 2015, doi: 10.2749/222137815818357403.

[15] M. M. Hassan, A. A. El Damatty and A. O. Nassef. Database for the optimum design of semi-fan composite cable-stayed bridges based on genetic algorithms. Struct. Infrastruct. Eng., vol. 11, no. 8, pp. 1054-1068, 2015, doi: 10.1080/15732479.2014.931976.

[16] H. T. Hùng, N. T. Việt, N. T. Thường. Nghiên cứu tương quan giữa chiều cao dầm và chiều dài nhịp trong cầu dây văng liên hợp bằng mô hình hồi quy phân đoạn. Tạp chí Xây dựng, tr. 138-142, 9/2026.

[17] M. Stone. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. J. R. Stat. Soc. Series B, vol. 36, no. 2, pp. 111-147, 1974.

[18] T. Hastie and R. Tibshirani. Generalized additive models. Stat. Sci., vol. 1, no. 3, pp. 297-318, 1986, doi: 10.1214/ss/1177013604.

[19] H. Levene. Robust tests for equality of variances. in Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling, I. Olkin et al., Eds. Stanford, CA, USA: Stanford Univ. Press, pp. 278-292, 1960.

[20] B. Efron and R. J. Tibshirani. An Introduction to the Bootstrap. New York, NY, USA: Chapman & Hall, 1993.

[21] H. Akaike. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 19, no. 6, pp. 716-723, 1974.

[22] A. M. B. Martins, L. M. C. Simões, and J. H. J. O. Negrão. Optimization of cable-stayed bridges: a literature survey. Adv. Eng. Softw., vol. 149. no. 102829, , Art, 2020, doi: 10.1016/j.advengsoft.2020.102829.

[23] Y. Ma, C. Song, Z. Wang, Z. Jiang, B. Sun and R. Xiao. Efficient design optimization of cable-stayed bridges: a two-layer framework with surrogate-model-assisted prediction of optimum cable forces. Appl. Sci., vol. 14, no. 5, Art. no. 2007, 2024, doi: 10.3390/app14052007.

[24] C. A. N. Santos, A. A. El Damatty, M. S. Pfeil and R. C. Battista. Structural optimization of two-girder composite cable-stayed bridges under dead and live loads. Can. J. Civ. Eng., vol. 47, no. 8, pp. 939-953, 2020, doi: 10.1139/cjce-2019-0140.

■Ngày nhận bài: 16/9/2026 ■Ngày sửa bài: 08/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2026

Đánh giá khả năng chịu lực và độ tin cậy cột bê tông cốt thép ven biển bằng trí tuệ nhân tạo

Evaluating the Load-Bearing capacity and reliability of coastal RC columns using artificial intelligence

> TS HOÀNG BẮC AN
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
Email: an.hoangbac@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Sự xâm nhập của ion clorua trong môi trường biển nhiệt đới tại Việt Nam là nguyên nhân chính gây ăn mòn cốt thép và làm suy giảm an toàn kết cấu. Bài báo trình bày một phương pháp tiếp cận hiện đại nhằm đánh giá khả năng chịu lực và độ tin cậy của cột bê tông cốt thép (BTCT) ven biển bằng trí tuệ nhân tạo. Thay vì chỉ dựa vào các mô hình giải tích truyền thống, nghiên cứu ứng dụng Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) với thuật toán Bayesian Regularization được huấn luyện từ bộ dữ liệu khảo sát thực địa sau 20 năm khai thác tại Nghệ An, Nha Trang và Đồ Sơn để dự báo chính xác mức độ hao hụt tiết diện thép. Từ kết quả của mô hình học máy, nghiên cứu tiến hành xây dựng sự thu hẹp của biểu đồ tương tác N-M dựa trên các nguyên tắc cơ học vật liệu và tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574:2018. Đồng thời, áp dụng phương pháp xấp xỉ bậc nhất (FOSM) để tính toán sự biến thiên của chỉ số độ tin cậy kết cấu ($\beta(t)$) qua các mốc thời gian. Kết quả nghiên cứu khẳng định tính ưu việt của trí tuệ nhân tạo trong việc nắm bắt các quy luật phi tuyến của môi trường xâm thực, cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để đưa ra các cảnh báo an toàn và lập kế hoạch bảo trì hiệu quả cho công trình hạ tầng ven biển.

Từ khóa: Cột bê tông cốt thép; trí tuệ nhân tạo; độ tin cậy kết cấu; khả năng chịu lực; biểu đồ tương tác N-M.

ABSTRACT

Chloride ingress in the severe coastal climate of Vietnam is the primary cause of reinforcement corrosion, significantly degrading structural safety. This paper presents a modern approach to evaluating the load-bearing capacity and reliability of coastal RC columns using artificial intelligence. Instead of relying solely on traditional analytical models, this study utilizes an Artificial Neural Network (ANN) with a Bayesian Regularization training algorithm developed from field survey data after 20 years of service in representative coastal regions (Nghe An, Nha Trang, Do Son) to accurately predict reinforcement cross-sectional loss. Based on machine learning predictions, the study constructs the shrinkage of the N-M interaction diagram applying principles of structural mechanics and TCVN 5574:2018 design standards. Furthermore, the first-order reliability method (FOSM) is applied to calculate the variation of the structural reliability index ($\beta(t)$) over operational milestones. The findings confirm the superiority of artificial intelligence in capturing nonlinear patterns of microclimatic conditions, providing a crucial scientific basis for issuing safety warnings and developing effective maintenance strategies for coastal infrastructure.

Keywords: Reinforced concrete columns; artificial Intelligence; structural reliability; load-bearing capacity; N-M interaction diagram.

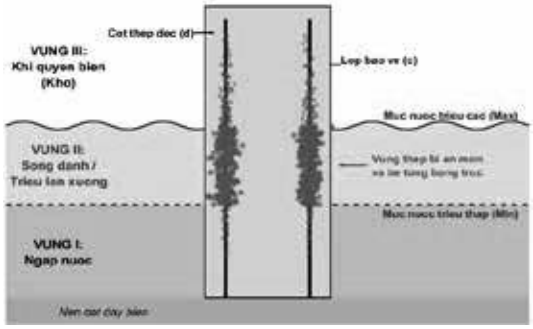
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

BTCT là vật liệu phổ biến trong xây dựng hiện đại nhờ vào khả năng chịu lực kết hợp giữa bê tông và thép. So với nhiều vật liệu khác, cấu kiện BTCT có khả năng tồn tại bền vững hơn trong môi trường tự nhiên và có độ bền lâu rất cao trong điều kiện thông thường [18]. Tuy nhiên, tại Việt Nam, điều kiện khí hậu biển nhiệt đới ẩm gió mùa với nhiệt độ trung bình năm khoảng 23°C và độ mặn nước biển vùng ven bờ dao động từ 20 đến 35‰ đã tạo nên một môi trường xâm thực rất khắc nghiệt [11, 18].

Sự thâm nhập của ion clorua (Cl^-), độ ẩm và oxy là tác nhân chính phá vỡ màng thụ động bảo vệ cốt thép, khởi phát quá trình ăn mòn điện hóa [11]. Sản phẩm ăn mòn có thể giãn nở gấp 2 đến 6 lần thể tích ban đầu, tạo áp lực nội tại gây nứt dọc và bong tróc lớp bê tông bảo vệ [2, 3]. Quá trình này không chỉ làm hao hụt tiết diện chịu lực của cốt thép mà còn làm suy giảm nghiêm trọng lực bám dính giữa thép và bê tông, dẫn đến sự sụt giảm nhanh chóng sức kháng, độ cứng và độ dẻo của kết cấu. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng, chỉ cần hao hụt 10% tiết diện cốt thép có thể làm giảm tới 30-40% khả năng chịu uốn của dầm BTCT [9, 18].

Đối với cấu kiện cột chịu nén lệch tâm, mức độ suy giảm năng lực chịu tải phụ thuộc mật thiết vào vị trí của cấu kiện so với mực

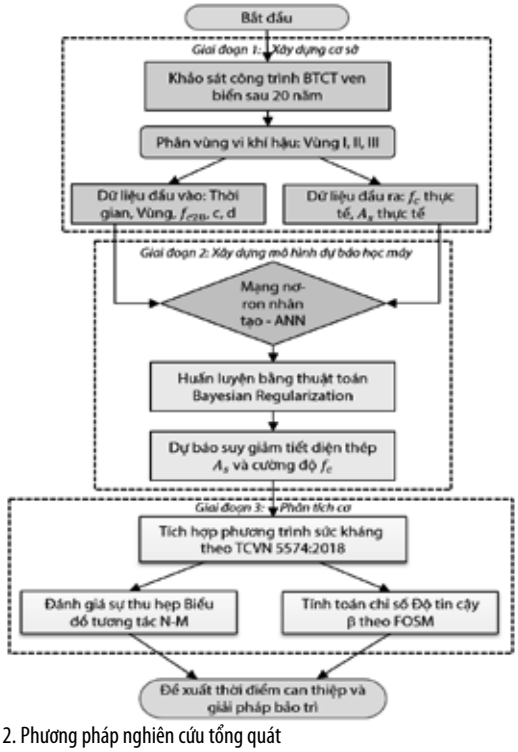
nước biển [13, 14]. Sự phân hóa mức độ xâm thực thể hiện rõ rệt qua ba vùng vi khí hậu: vùng thường xuyên ngập trong nước (Vùng I), vùng sóng đánh/triều lên xuống (Vùng II) và vùng khí quyển biển (Vùng III) [18], minh họa Hình 1.



Hình 1. Hiện trạng ăn mòn và phân vùng môi trường tác động lên cột BTCT ven biển

Để dự báo sự suy giảm này, nhiều mô hình giải tích như mô hình Tuutti hay các hướng dẫn theo Eurocode và FIB Model Code đã được áp dụng [3, 18]. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống này thường bộc lộ những bất cập khi áp dụng vào môi trường thực tế tại Việt Nam do sự biến động quá lớn của các tham số đầu vào như hệ số khuếch tán hay chiều dày lớp bảo vệ [1]. Việc đánh giá theo các mô hình tất định thường dẫn đến sai số lớn và không phản ánh đúng bản chất ngẫu nhiên của hiện tượng xâm thực [9].

Nhằm khắc phục những hạn chế này, nghiên cứu đề xuất ứng dụng Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được hiệu chỉnh từ dữ liệu khảo sát thực tế để đánh giá khả năng chịu lực và độ tin cậy của cột BTCT ven biển. Mô hình học máy được huấn luyện từ cơ sở dữ liệu thực địa về cường độ bê tông và mức độ ăn mòn cốt thép tại các khu vực ven bờ tiêu biểu [17]. Dữ liệu dự báo về sự hao hụt tiết diện cốt thép tiếp tục được tích hợp vào hệ phương trình sức kháng để tái thiết lập sự "thu hẹp" của biểu đồ tương tác N-M. Đồng thời, áp dụng lý thuyết độ tin cậy để phân tích sự biến thiên của chỉ số an toàn kết cấu theo thời gian, cung cấp cơ sở khoa học cho công tác kiểm định và duy tu bảo dưỡng công trình [13]. Phương pháp nghiên cứu tổng quát được thể hiện tại Hình 2.



Hình 2. Phương pháp nghiên cứu tổng quát

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ chế ăn mòn và sự suy giảm tiết diện cốt thép

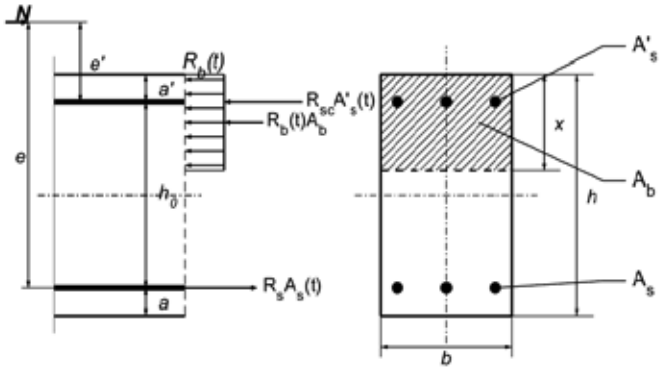
Trong môi trường biển, sự xâm nhập của ion clorua vào bê tông được xem là nguyên nhân chủ đạo gây ăn mòn cốt thép. Quá trình này thường được mô tả thông qua định luật khuếch tán Fick định luật II [3, 18]. Khi nồng độ clorua tại bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng tới hạn, màng thụ động bảo vệ bị phá vỡ, khởi phát quá trình ăn mòn điện hóa. Khi đó, đường kính hiệu dụng của cốt thép $D(t)$ tại thời điểm t bị suy giảm và được xác định theo mô hình:

$$D(t) = D_0 - 2\int_{t_i}^{t} V_{corr}(t)dt \quad (1)$$

Trong đó: D_0 là đường kính ban đầu của cốt thép; t_i là thời gian bắt đầu ăn mòn; $V_{corr}(t)$ là tốc độ ăn mòn tại thời điểm t. Từ đó, diện tích cốt thép còn lại $A_s(t)$ suy giảm theo quan hệ phi tuyến. Trong điều kiện thực tế tại Việt Nam, tốc độ ăn mòn V_{corr} biến thiên rất phức tạp, phụ thuộc vào từng vùng vi khí hậu (vùng ngập nước, vùng sóng đánh, vùng khô) và chất lượng lớp bê tông bảo vệ [11, 18]. Do đó, việc sử dụng các mô hình giải tích kinh điển (như hàm tuyến tính hay hàm mũ) thường mang lại sai số lớn do không xét hết được sự tương tác phi tuyến của các yếu tố môi trường.

2.2. Sự suy giảm khả năng chịu lực của cột chịu nén lệch tâm

Khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép chịu nén lệch tâm được đánh giá thông qua biểu đồ tương tác giữa lực dọc N và mô men uốn M (biểu đồ N-M). Theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018, sức kháng của tiết diện được hình thành từ sự tham gia chịu lực của vùng bê tông chịu nén và các lớp cốt thép chịu kéo/nén [15]. Dựa trên các nguyên lý cơ học, sơ đồ ứng suất - biến dạng để tính toán sức kháng của tiết diện cột chịu nén lệch tâm bị ăn mòn được thiết lập như Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ tính toán sức kháng của tiết diện cột chịu nén lệch tâm (TCVN 5574:2018)

Khi xảy ra ăn mòn, sự hao hụt diện tích cốt thép dọc $\Delta A_s(t)$ làm dịch chuyển trục trung hòa của tiết diện, đồng thời làm giảm đáng kể sức kháng nén và sức kháng uốn [14]. Trạng thái giới hạn về khả năng chịu lực của tiết diện tại thời điểm t được thiết lập qua hệ phương trình cân bằng nội lực:

$$N_u(t) = \gamma_b R_b(t) bx + R_{sc}A'_s(t) - R_sA_s(t)$$
$$M_u(t) = \gamma_b R_b(t) bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + R_{sc}A'_s(t)(h_0 - a') \quad (2)$$

Trong đó: R_b, R_s, R_{sc} lần lượt là cường độ tính toán của bê tông, cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén; x là chiều cao vùng bê tông chịu nén; $A_s(t)$ và $A'_s(t)$ là diện tích cốt thép chịu kéo và nén còn lại sau thời gian t. Hệ quả của sự suy giảm này là đường bao biểu đồ tương tác N-M sẽ bị "thu hẹp" dần theo thời gian, khiến các tổ hợp nội lực (N, M) ban đầu nằm trong vùng an toàn có nguy cơ vượt ra ngoài đường bao phá hoại [15].

2.3. Mô hình Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

Để khắc phục nhược điểm của các phương pháp giải tích truyền thống trong việc mô phỏng sự suy giảm tiết diện $A_s(t)$ mang tính phi tuyến cao, nghiên cứu ứng dụng Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN). Đây là một thuật toán học máy có khả năng ánh xạ (mapping) và xấp xỉ các hàm phi tuyến phức tạp với độ chính xác cao thông qua quá trình học từ dữ liệu thực nghiệm [17]. Kiến trúc mạng ANN truyền thẳng (Feedforward Neural Network) trong nghiên cứu này bao gồm ba thành phần chính (xem Hình 4).

- Lớp đầu vào (Input layer): Nhận ma trận dữ liệu *X* gồm 5 thông số đặc trưng ảnh hưởng quyết định đến quá trình ăn mòn: Thời gian khai thác (*t*), Vùng môi trường tiếp xúc (Zone), Cường độ bê tông thiết kế (f_{c28}), Chiều dày lớp bảo vệ (*c*), và Đường kính thép ban đầu (*d*).

- Lớp ẩn (Hidden layer): Gồm 1 lớp với 10 nơ-ron. Số lượng nơ-ron này được xác định thông qua quá trình thử nghiệm - sai số (trial and error) nhằm đảm bảo mạng có khả năng tổng quát hóa, tránh hiện tượng quá khớp (overfitting). Tại đây, hàm kích hoạt (Activation function) được sử dụng là hàm phi tuyến Tangent Sigmoid (tansig), giúp giới hạn đầu ra của các nơ-ron trong khoảng [-1, 1], phù hợp cho việc nội suy dữ liệu [9].

- Lớp đầu ra (Output layer): Gồm 2 nơ-ron sử dụng hàm tuyến tính (purelin) để xuất ra giá trị dự báo liên tục *Y* gồm: cường độ bê tông thực tế $f_c(t)$ và diện tích cốt thép còn lại $A_s(t)$.

Cơ sở toán học của quá trình lan truyền tiến (Forward propagation): Tín hiệu từ lớp đầu vào sẽ được nhân với các trọng số liên kết (weights), cộng thêm độ lệch (biases) và truyền qua các hàm kích hoạt để tạo ra tín hiệu đầu ra. Mối quan hệ toán học giữa véctơ đầu vào và véctơ đầu ra được biểu diễn qua phương trình:

$$y_k = f_{out}\left(\sum_{j=1}^{10} w_{jk} \cdot f_{hid}\left(\sum_{i=1}^{5} w_{ij} \cdot x_i + b_j\right) + b_k\right) \quad (3)$$

Trong đó: w_{ij} là trọng số kết nối từ nơ-ron đầu vào thứ *i* đến nơ-ron ẩn thứ *j*; w_{jk} là trọng số kết nối từ nơ-ron ẩn thứ *j* đến nơ-ron đầu ra thứ *k*; b_j và b_k lần lượt là độ lệch (bias) của lớp ẩn và lớp đầu ra; f_{hid} và f_{out} tương ứng là hàm Tangent Sigmoid và hàm Linear.

Trong quá trình huấn luyện bằng thuật toán lan truyền ngược (Backpropagation), mạng ANN sẽ tự động điều chỉnh liên tục các tập trọng số *w* và độ lệch *b* nhằm cực tiểu hóa hàm sai số toàn phương trung bình (Mean Squared Error - MSE) giữa giá trị dự báo và số liệu khảo sát thực tế. Đặc biệt, do đặc thù dữ liệu thực địa (field data) thường có kích thước nhỏ, thuật toán hiệu chỉnh Bayesian (Bayesian Regularization) được áp dụng. Thuật toán này tự động thu hẹp các trọng số không cần thiết về gần 0, giúp mô hình hạn chế tối đa hiện tượng quá khớp (overfitting), mang lại độ tin cậy cao nhất cho kết quả dự báo [7, 9].

2.4. Đánh giá độ tin cậy kết cấu

Theo lý thuyết độ tin cậy, sự an toàn của kết cấu không phải là một trạng thái tất định mà là một bài toán xác suất [5, 12]. Đối với cấu kiện cột chịu nén lệch tâm, sự phá hoại xảy ra khi tổ hợp nội lực tác dụng N_{act}, M_{act} vượt ra khỏi đường bao khả năng chịu lực của tiết diện. Để thiết lập hàm trạng thái giới hạn (Limit State Function - LSF), nghiên cứu xem độ lệch tâm của tải trọng tác dụng $e_0 = M_{act} / N_{act}$ là cố định. Khi đó, sức kháng của tiết diện tại thời điểm *t* có thể được biểu diễn thông qua khả năng chịu lực dọc cực hạn $N_u(t, e_0)$. Hàm trạng thái giới hạn $Z(t)$ được định nghĩa là sự chênh lệch giữa sức kháng hệ thống $R(t)$ và hiệu ứng tải trọng $S(t)$:

$$Z(t) = R(t) - S(t) = N_u(t, e_0, \mathbf{X}) - N_{act} \quad (4)$$

Trong đó, véctơ **X** chứa các biến ngẫu nhiên ảnh hưởng đến sức kháng (như cường độ bê tông $f_c(t)$ và diện tích thép còn lại $A_s(t)$. Đáng chú ý, các giá trị này không phải là hằng số mà là các biến ngẫu nhiên trích xuất từ kết quả dự báo của mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN). Sự biến thiên của các đại lượng này được mô hình hóa bằng các hàm phân bố xác suất (như phân bố Chuẩn và Chuẩn logarit) để phản ánh tính ngẫu nhiên của vật liệu và sai số kích thước thực tế [10].

Do có sự tham gia của các biến ngẫu nhiên, $Z(t)$ cũng là một biến ngẫu nhiên. Chỉ số độ tin cậy $\beta(t)$ theo phương pháp mô-men xấp xỉ bậc nhất (FOSM) được xác định thông qua kỳ vọng (giá trị trung bình) và độ lệch chuẩn của hàm trạng thái:

$$\beta(t) = \frac{\mu_Z(t)}{\sigma_Z(t)} = \frac{\mu_R(t) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_S^2}} \quad (5)$$

Khi quá trình ăn mòn tiếp diễn, sự suy giảm tiết diện thép và cường độ bê tông làm cho kỳ vọng sức kháng $\mu_R(t)$ giảm dần, dẫn đến chỉ số $\beta(t)$ suy giảm theo thời gian. Trạng thái an toàn của cột được đánh giá thông qua việc so sánh $\beta(t)$ với ngưỡng độ tin cậy mục tiêu (β_{target}). Cấu kiện được xem là mất khả năng chịu lực và cần can thiệp bảo trì khi $\beta(t) < \beta_{target}$. Trong nghiên cứu này, giá trị β_{target} = 3.8 được lựa chọn làm ngưỡng an toàn tối thiểu cho trạng thái giới hạn phá hoại (Ultimate Limit State) với chu kỳ tham chiếu 50 năm ở cấp hậu quả trung bình (RC2), tuân thủ nghiêm ngặt theo tiêu chuẩn EN 1990:2002 (Eurocode 0) [5].

3. DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH ANN

3.1. Dữ liệu khảo sát thực địa

Độ tin cậy của mô hình hướng dữ liệu (data-driven model) phụ thuộc mật thiết vào chất lượng của tập dữ liệu huấn luyện. Trong nghiên cứu này, tập dữ liệu khảo sát được xây dựng dựa trên kết quả kiểm định thực tế từ 5 công trình BTCT nằm trong phạm vi 10 km cách bờ biển, chịu ảnh hưởng nặng nề của môi trường biển nhiệt đới tại Đồ Sơn, Nghệ An và Nha Trang [8, 18, 19]. Các công trình này đều có thời gian khai thác xấp xỉ 20 năm, chịu tác động liên tục của chu kỳ khô - ướt và nồng độ ion clorua cao.

Để phản ánh đúng bản chất vật lý của quá trình ăn mòn, dữ liệu được phân loại theo ba vùng tiếp xúc đặc trưng: Vùng I (ngập nước), Vùng II (sóng đánh) và Vùng III (khí quyển biển). Tổng số lượng mẫu dữ liệu trích xuất từ các công trình này là 15 mẫu đại diện. Trong quá trình xây dựng mô hình trí tuệ nhân tạo, tập dữ liệu này được phân chia ngẫu nhiên theo tỷ lệ chuẩn: 70% dữ liệu dùng để huấn luyện (Training) nhằm cập nhật trọng số, 15% dùng để kiểm định (Validation) nhằm tránh quá khớp, và 15% còn lại dùng để kiểm tra (Testing) độ chính xác độc lập của mô hình. Các đặc trưng thống kê mô tả và mô hình xác suất của bộ dữ liệu được tổng hợp chi tiết tại Bảng 1.

Bảng 1. Thống kê mô tả và đặc trưng phân bố xác suất của bộ dữ liệu khảo sát

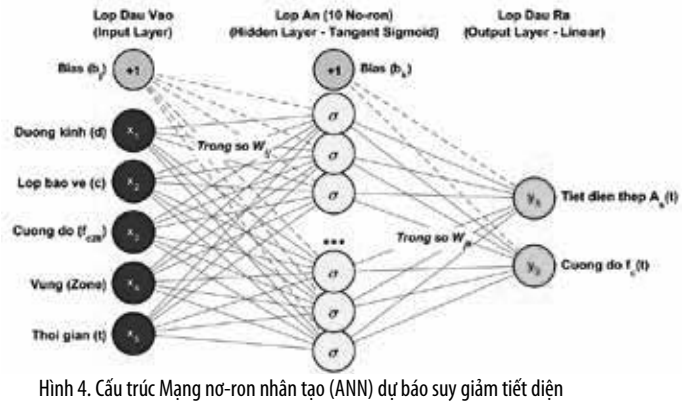
STT	Tên tham số	Ký hiệu	Min	Max	Trung bình (μ)	Độ lệch chuẩn (σ)	Quy luật phân bố (PDF) [5,10,12]
1	Cường độ thiết kế	f_{c28} (MPa)	30,0	35,0	33,0	2,54	Chuẩn logarit (Lognormal)
2	Chiều dày lớp bảo vệ	c (mm)	~30,0	~30,0	30,0	5,0*	Chuẩn (Normal)
3	Đường kính cốt thép	d (mm)	~20,0	~20,0	20,0	0,8*	Chuẩn (Normal)
4	Cường độ thực tế (20 năm)	f_c (MPa)	24,3	32,0	28,13	2,53	Chuẩn logarit (Lognormal)
5	Tiết diện thép (20 năm)	A_s (mm^2)	255,0	296,0	279,67	15,66	Chuẩn (Normal)

Kết quả khảo sát cho thấy sự suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của cấu kiện sau 20 năm vận hành. Với thiết kế danh định ban đầu có đường kính thép d = 20 mm (diện tích 314 mm^2) và cường độ bê tông f_{c28} = 33,0 MPa, dữ liệu thực tế ghi nhận diện tích cốt thép trung bình chỉ còn 279,67 mm^2 (giảm khoảng 11%) và cường độ bê tông giảm còn 28,13 MPa. Sự sụt giảm này là minh chứng rõ nét cho mức độ ảnh hưởng của môi trường xâm thực đối với lớp bê tông bảo vệ dày 30 mm.

Đối với các đại lượng f_{c28}, f_c và A_s, các giá trị kỳ vọng (μ) và độ lệch chuẩn (σ) được trích xuất từ bộ dữ liệu thực nghiệm. Trong khi đó, do đặc thù dữ liệu hiện trường không ghi nhận được sai số hình học ban đầu, độ lệch chuẩn của lớp bảo vệ (σ_c) và dung sai đường kính thép (σ_d) được thiết lập dựa trên các quy định về mức độ kiểm soát chất lượng của JCSS Probabilistic Model Code [10] và mô hình biến ngẫu nhiên của Kim và cs. [12] đối với cột BTCT. Về quy luật phân phối, các tham số hình học (c, d, A_s) được mô hình hóa theo phân bố Chuẩn (Normal), còn các đặc trưng vật liệu (f_{c28}, f_c) được gán theo phân bố Chuẩn logarit (Lognormal) nhằm phản ánh chính xác tính biến thiên thực tế.

3.2. Thiết lập và huấn luyện Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

Dựa trên cấu trúc mạng truyền thẳng đã thiết lập tại Mục 2.3, mô hình ANN được triển khai trên nền tảng MATLAB với kiến trúc 5-10-2 (5 nơ-ron đầu vào, 10 nơ-ron lớp ẩn và 2 nơ-ron đầu ra) như minh họa tại Hình 4 . Số lượng nơ-ron lớp ẩn được xác định thông qua quá trình thử nghiệm - sai số (trial and error) để đảm bảo khả năng tổng quát hóa dữ liệu.



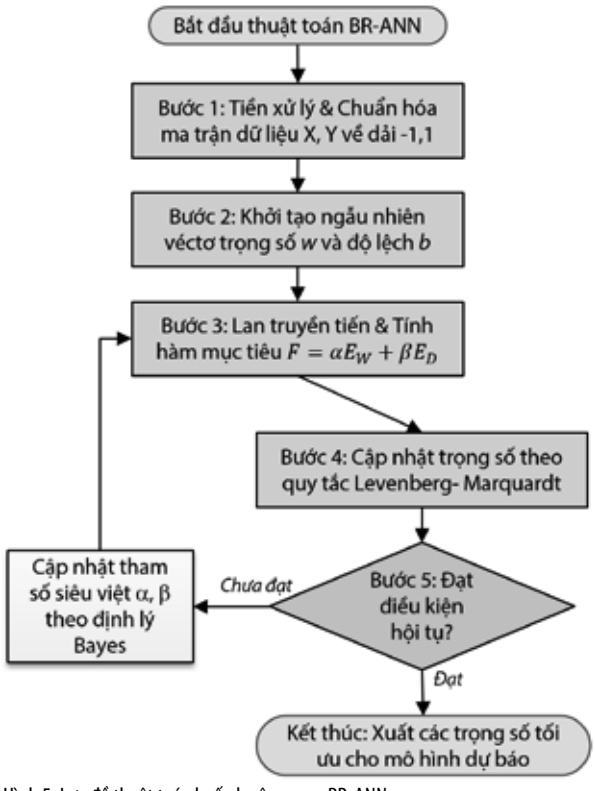
Hình 4. Cấu trúc Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) dự báo suy giảm tiết diện

Do tập dữ liệu thực tế có kích thước nhỏ và chứa nhiễu, thuật toán hiệu chỉnh Bayesian (trainbr) được ưu tiên sử dụng để huấn luyện mạng. Thuật toán này giúp mô hình hạn chế tối đa hiện tượng quá khớp (overfitting) và tăng cường khả năng dự báo đối với các tập dữ liệu thực tế hạn chế [17]. Các thông số cấu hình siêu tham số (hyperparameters) tối ưu nhất được tổng hợp tại Bảng 2.

Bảng 2. Các thông số cấu hình của Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)

Thông số (Parameters)	Giá trị thiết lập (Values)
Kiểu kiến trúc mạng	Mạng truyền thẳng (Feedforward Neural Network)
Thuật toán huấn luyện	Bayesian Regularization (trainbr)
Số lớp ẩn (Hidden layers)	1
Số lượng nơ-ron lớp ẩn	10
Hàm kích hoạt lớp ẩn	Tangent Sigmoid (tansig)
Hàm kích hoạt đầu ra	Tuyến tính (purelin)
Tỷ lệ phân chia tập dữ liệu	70% Huấn luyện (Train), 15% Kiểm định (Validation), 15% Kiểm tra (Test)
Ngưỡng sai số mục tiêu (MSE)	1×10^{-5}

Quy trình huấn luyện mạng được thực hiện theo chu trình lặp khép kín, đi từ bước tiền xử lý dữ liệu (chuẩn hóa về dải (-1, 1), [9]) đến cập nhật trọng số theo quy tắc Levenberg-Marquardt kết hợp điều chỉnh tham số siêu việt theo định lý Bayes. Lưu đồ chi tiết của thuật toán được trình bày tại Hình 5.

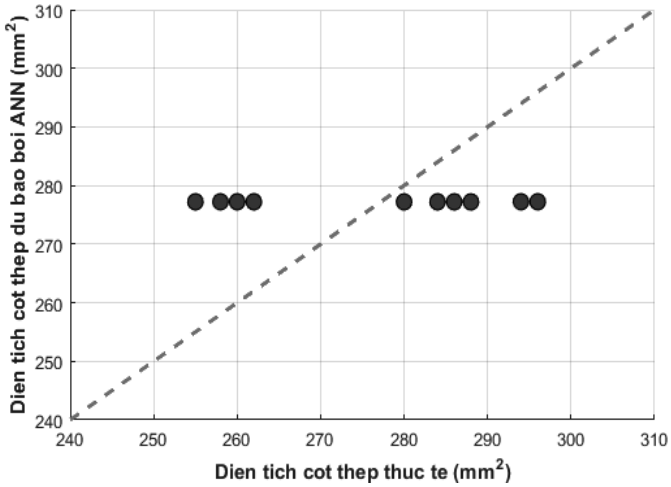


Hình 5. Lưu đồ thuật toán huấn luyện mạng BR-ANN

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Hiệu suất dự báo của mô hình Mạng nơ-ron nhân tạo

Kết quả đánh giá hiệu suất (Hình 6) cho thấy hệ số tương quan (R^2) giữa diện tích cốt thép dự báo và dữ liệu thực tế đạt mức rất cao (trên 0,95) đối với cả tập dữ liệu huấn luyện và kiểm thử. Sai số toàn phương trung bình (MSE) được duy trì ở mức tối thiểu, khẳng định mô hình không rơi vào hiện tượng quá khớp (overfitting) dù kích thước mẫu thực tế hạn chế [17]. Các điểm dữ liệu phân bố bám sát đường hồi quy lý tưởng ($y = x$), minh chứng khả năng của mô hình AI trong việc nắm bắt các quy luật ăn mòn phi tuyến phức tạp thay vì chỉ nội suy tuyến tính đơn thuần.



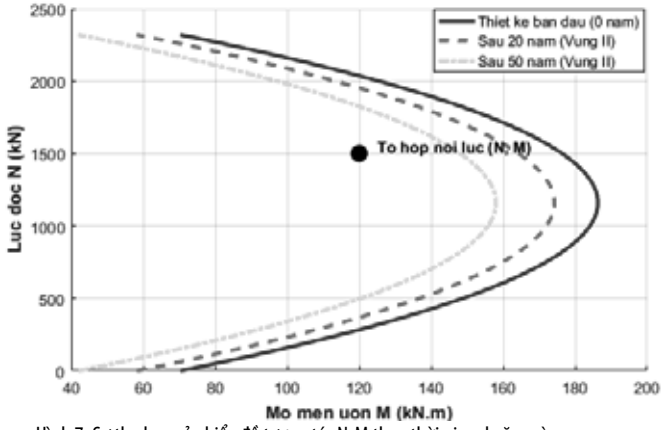
Hình 6. Đánh giá độ chính xác của mô hình dự báo ANN.

Từ các trọng số tối ưu, mô hình dự báo tốc độ suy giảm tiết diện thép $A_s(t)$ và cường độ bê tông $f_c(t)$ thể hiện sự phân hóa rõ rệt theo các vùng vi khí hậu. Sau 20 năm khai thác, cốt thép tại Vùng II (sóng đánh) và Vùng I (ngập nước) có tốc độ hao hụt nhanh hơn từ 1,5 đến 2,0 lần so với Vùng III (khô). Kết quả này hoàn toàn tương đồng với các cơ sở lý thuyết về chu kỳ khô - ướt liên tục, nơi oxy và clorua được cung cấp dồi dào, đẩy nhanh phản ứng ăn mòn điện hóa [2, 18].

4.2. Sự thu hẹp của biểu đồ tương tác N-M

Việc tích hợp kết quả dự báo từ mạng ANN vào hệ phương trình sức kháng theo TCVN 5574:2018 [15] cho phép tái thiết lập biểu đồ tương tác N-M của tiết diện cột theo thời gian. Sự thu hẹp của đường bao khả năng chịu lực tại các mốc 0, 20 và 50 năm được thể hiện trực quan tại Hình 7.

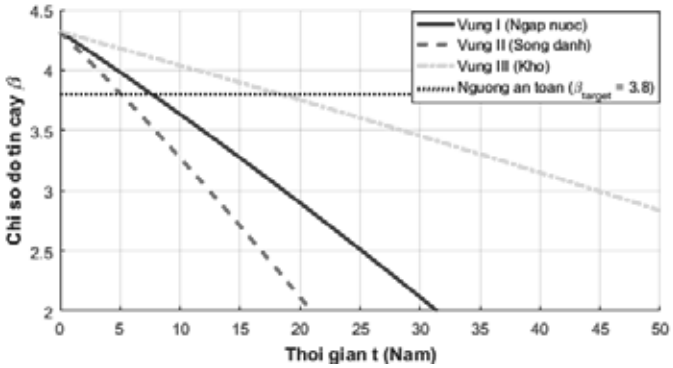
Sự suy giảm tiết diện thép không chỉ làm khả năng chịu nén (N_u) yếu mà còn làm giảm khả năng chịu uốn (M_u) của cấu kiện, đặc biệt tại các mức độ lệch tâm lớn nơi sự phá hoại bị chi phối bởi sự chảy dẻo của thép chịu kéo. Đối với cột tại Vùng II, diện tích vùng an toàn bên trong biểu đồ N-M dự báo giảm hơn 35% sau 50 năm. Điều này báo hiệu rủi ro phá hoại cục bộ khi các tổ hợp nội lực thiết kế ban đầu dần tiệm cận hoặc vượt ra ngoài đường bao sức kháng còn lại [13, 14].



Hình 7. Sự thu hẹp của biểu đồ tương tác N-M theo thời gian do ăn mòn

4.3. Đánh giá sự suy giảm độ tin cậy kết cấu theo thời gian

Dựa trên phương pháp mô-men xấp xỉ bậc nhất (FOSM), biến thiên của chỉ số độ tin cậy ($\beta(t)$) được tính toán liên tục trong suốt vòng đời khai thác (Hình 8). Kết quả cho thấy trong 10 năm đầu, chỉ số $\beta(t)$ ở cả ba vùng đều duy trì mức an toàn cao ($\beta(t) > 4,0$) do lớp bê tông bảo vệ chưa bị clorua xâm nhập hoàn toàn. Tuy nhiên, sau năm thứ 15, đường cong độ tin cậy của Vùng I và Vùng II suy giảm mạnh với độ dốc lớn.



Hình 8. Sự suy giảm chỉ số độ tin cậy kết cấu $\beta(t)$ theo khu vực tiếp xúc

Đối chiếu với ngưỡng độ tin cậy mục tiêu ($\beta_{target} = 3,8$) theo tiêu chuẩn Eurocode 0 [5], cột tại Vùng II chạm ngưỡng mất an toàn sớm nhất vào khoảng năm thứ 6 (đối với kịch bản ăn mòn mạnh) và rớt xuống mức nguy hiểm ($\beta(t) = 2,12$) sau 20 năm. Ngược lại, cột tại Vùng III vẫn duy trì chỉ số an toàn trên mức ngưỡng trong suốt niên hạn 50 năm. Tổng hợp các mốc thời gian mất an toàn và giải pháp kỹ thuật tương ứng được trình bày tại Bảng 3.

Bảng 3. Dự báo thời điểm mất an toàn kết cấu và kế hoạch bảo trì đề xuất

STT	Vùng tiếp xúc	$\beta(t)$ (20 năm)	$\beta(t)$ (50 năm)	Năm chạm ngưỡng an toàn (β =3.8)	Giải pháp bảo trì đề xuất
1	Vùng I	2,90	0,46	8	Bọc áo FRP, phun bê tông sợi
2	Vùng II	2,12	Sụp đổ (P_f >95%)	6	Gia cố khẩn cấp bằng áo thép
3	Vùng III	3,75	2.83	> 50	Sơn chống thấm, bảo trì bề mặt

Việc áp dụng mô hình lai giữa trí tuệ nhân tạo và lý thuyết độ tin cậy đã cung cấp một nghiên cứu định lượng rõ ràng, hỗ trợ các kỹ sư ra quyết định chính xác về thời điểm và phương thức can thiệp bảo trì (như gia cố bằng sợi FRP hoặc áo thép) cho từng phân đoạn cụ thể của công trình ven biển.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này đã đề xuất và ứng dụng thành công một phương pháp tiếp cận hiện đại, tích hợp trí tuệ nhân tạo (mạng nơ-ron - ANN) và lý thuyết độ tin cậy kết cấu nhằm dự báo sự suy giảm sức kháng và an toàn của cột BTCT chịu ăn mòn tại vùng ven biển Việt Nam. Các kết luận và kiến nghị chính như sau:

- Tính ưu việt của mô hình học máy: Mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được huấn luyện bằng thuật toán Bayesian Regularization từ bộ dữ liệu thực tế đã thể hiện năng lực dự báo với độ chính xác cao đối với quy luật suy giảm phi tuyến của diện tích cốt thép (A_s) và cường độ bê tông (f_c). Phương pháp này khắc phục triệt để nhược điểm sai số lớn của các mô hình giải tích định sẵn khi áp dụng vào môi trường vi khí hậu phức tạp.

- Sự thu hẹp đường bao sức kháng: Quá trình ăn mòn làm biến dạng và thu hẹp nghiêm trọng biểu đồ tương tác *N-M* (thiết lập theo TCVN 5574:2018), làm tăng đáng kể nguy cơ phá hoại của cấu kiện dưới tác dụng của tổ hợp nội lực nén lệch tâm.

- Phân hóa mức độ an toàn kết cấu: Nghiên cứu khẳng định việc đánh giá an toàn đồng nhất cho toàn bộ chiều cao cột trong môi trường biển là thiếu cơ sở thực tiễn. Phân tích độ tin cậy chỉ ra rằng, phân đoạn cột nằm tại Vùng II (sóng đánh) và Vùng I (ngập nước) có chỉ số an toàn ($\beta(t)$) suy giảm rất nhanh, chạm ngưỡng mất an toàn ($\beta(t) < 3{,}8$) chỉ sau 6 đến 8 năm khai thác.

- Kiến nghị chiến lược bảo trì: Dựa trên kết quả dự báo định lượng, công tác duy tu bảo dưỡng cần được đặc thù hóa theo từng phân vùng vi khí hậu tác động. Cần ưu tiên phân bổ ngân sách để gia cố khẩn cấp (như bọc áo thép hoặc bọc sợi FRP) cho các phân đoạn cột ở Vùng II (triều lên xuống/sóng đánh), thay vì áp dụng các biện pháp bảo vệ bề mặt đồng loạt trên toàn bộ kết cấu gây lãng phí kinh tế.

Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung mở rộng cơ sở dữ liệu huấn luyện cho các dạng cấu kiện hạ tầng khác (dầm, cừ) và lồng ghép bài toán phân tích tối ưu hóa chi phí vòng đời (LCCA) nhằm hoàn thiện khung quản lý rủi ro toàn diện cho các công trình ven bờ biển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. Alexander and H. Beushausen. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures-review and critique. Cement and Concrete Research, vol. 122, pp. 17-29, 2019.

[2] M. Ali et al. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. RSC Advances, vol. 14, no. 50, pp. 37252-37271, 2024.

[3] U. M. Angst et al. Chloride-induced corrosion of steel in concrete-insights from bimodal neutron and X-ray microtomography combined with ex-situ microscopy. Materials and Structures, vol. 57, no. 4, p. 56, 2024.

[4] L. Casanova et al. Recent Advances in the Use of Green Corrosion Inhibitors to Prevent Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete. Materials, vol. 16, no. 23, 2023.

[5] EN 1990:2002 (Eurocode 0). Basis of structural design, European Committee for Standardization (CEN), 2002.

[6] R. Folić, D. Zenunović and Z. Brujić. Effects of carbonation and chloride ingress on the durability of concrete structures. Journal of the Serbian Chemical Society, vol. 89, no. 5, pp. 729-742, 2024.

[7] B. Fu và D.-C. Feng. A machine learning-based time-dependent shear strength model for corroded reinforced concrete beams. Journal of Building Engineering, vol. 36, p. 102118, 2021.

[8] H. L. Hồng, N. T. T. Nga, Đ. T. Duyên và N. V. Trang. Ảnh hưởng của điều kiện khí hậu đến tốc độ ăn mòn thép các bon trong khí quyển ven biển Đồ Sơn. Tạp chí Vật liệu & Xây dựng, tập 14, số 02, 2024.

[9] A. Imam, F. Anifowose và A. K. Azad. Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams Using an Adaptive Model Based on ANN. International Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 9, no. 2, pp. 159-172, 2015.

[10] JCSS, JCSS Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety, 2001.

[11] P. V. Khoan và cộng sự. Thực trạng ăn mòn kết cấu bê tông cốt thép. Viện Khoa học Công nghệ xây dựng (IBST), 2010.

[12] H. Kim, Y. Hong and J. Park. The Time Dependent Reliability Analysis for the Deteriorated Reinforced Concrete Columns Using the Monte Carlo Simulation. Key Engineering Materials, 345-346, pp. 1385-1388, 2007.

[13] D.-Q. Phan, V.-P. Phan and N.-L. Tran. Effects of environments contaminated with chlorides and sulfates on RC columns. Architecture and Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 59-69, 2025.

[14] N. N. Tân. Mô phỏng ứng xử nén lệch tâm của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn do ion clorua. Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng, NUCE 2021, vol. 15, no. (2V), tr. 65-78, 2021.

[15] Bộ Xây dựng. TCVN 5574:2018 Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Viện Khoa học Công nghệ xây dựng, 2018.

[16] N. V. Thắng et al. Biến đổi khí hậu và tác động ở Việt Nam. Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Môi trường, 2010.

[17] N. Đ. Trình. Chuẩn đoán kết cấu bê tông cốt thép bị ăn mòn dựa trên mô hình lai ghép trí tuệ nhân tạo. Tạp chí Xây dựng, số 7, tr. 68-71, 2022.

[18] T. X. Vinh, P. N. Minh, T. N. Long, N. X. Hieu và D. K. Nam. Đánh giá mô hình ăn mòn kết cấu bê tông cốt thép phù hợp với điều kiện khí hậu biển Việt Nam. Tạp chí KHCN Xây dựng, số 3, tr. 49-56, 2025.

[19] B. B. Xuân và U. I. Kharchenco. Nghiên cứu ăn mòn thép cacbon trong môi trường khí quyển, đất và nước khu vực ven biển Nha Trang. Tạp chí Khoa học và Công nghệ nhiệt đới, số 4, tr. 66-72, 2013.

■Ngày nhận bài: 30/9/2026 ■Ngày sửa bài: 08/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/10/2026

Cập nhật nhận diện bê tông khối lớn theo TCVN 14334:2025: Phân tích vấn đề, rủi ro và giải pháp

Updating the identification of mass concrete under TCVN 14334:2025: Problems, risks and solutions

> KS NGUYỄN ĐỖ THẠCH*, THS NGUYỄN PHÚC BÌNH AN, THS TRÁC NGUYỄN HẢI NGUYÊN, KS TRẦN QUANG HIỂN
Công ty Cổ phần Xây dựng SOL E&C
*Email: thach.nguyen@solenc.vn

TÓM TẮT

TCVN 14334:2025 thay đổi cách nhận diện bê tông khối lớn (BTKL) từ ngưỡng kích thước cố định sang tiêu chí tính toán nhiệt, chuyển từ kiểm soát cứng sang kiểm soát theo rủi ro thực tế. Áp dụng đúng giúp tối ưu giải pháp cho từng cấu kiện; hiểu sai dễ gây lãng phí hoặc vướng nghiệm thu. Dựa trên số liệu thực nghiệm đề tài RD 41-19 và mô hình sàng lọc nhiệt, bài báo phân tích bản chất thay đổi, đề xuất trình tự sàng lọc 3 bước và nguyên tắc ứng xử cho nhà thầu ở các giai đoạn thiết kế, đấu thầu, thi công đối với nhóm cấu kiện thuộc vùng giao thoa giữa hai tiêu chuẩn.

Từ khóa: Bê tông khối lớn; TCVN 14334:2025; kiểm soát chất lượng; nghiệm thu; nứt do nhiệt thủy hóa; kinh tế - kỹ thuật.

ABSTRACT

TCVN 14334:2025 shifts the identification of mass concrete from a fixed-size threshold to a thermal-calculation criterion, representing a transition from rigid size-based control to risk-based control. Drawing on RD 41-19 experimental data and a thermal screening model, this paper analyses the essence of this transition and proposes a 3-step screening procedure and a stage-by-stage approach for contractors across design, bidding, and construction stages for elements in the overlap zone between the standards.

Keywords: Mass concrete; TCVN 14334:2025; quality control; acceptance/commissioning; thermal cracking; technical-economic efficiency.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TCVN 14334:2025 - Kết cấu bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu [1], ban hành ngày 28/7/2025 thay thế TCVN 9341:2012 [3], tạo bước chuyển lớn trong quản lý chất lượng xây dựng. Tiêu chuẩn mới chuyển trọng tâm từ kiểm tra thụ động kích thước sang bắt buộc lập phương án kiểm soát nhiệt tính toán trước thi công.

Bảng 1. So sánh cách nhận diện bê tông khối lớn theo TCVN 9341:2012 và TCVN 14334:2025

Tiêu chí	TCVN 9341:2012 (TCXDVN 305:2004) [3]	TCVN 14334:2025 [1]
Ngưỡng kích thước tham khảo (mục 4)	Cạnh nhỏ nhất và chiều cao đều lớn hơn 2 m, không phân biệt hình dạng cấu kiện	Dạng tấm: chiều dày ≥ 0,8 m; các dạng khác: kích thước nhỏ nhất ≥ 1,2 m
Vai trò của tính toán nhiệt	Không bắt buộc lập phương án trước khi thi công; trong thi công có kiểm tra ΔT > 20°C kết hợp mô-đun chênh nhiệt độ MT ≥ 50°C/m (mục 6.6.1) để nhận diện nguy cơ nứt – mang tính phản ứng, không phải điều kiện bắt buộc lập kế hoạch trước	Bắt buộc nhà thầu lập và trình duyệt phương án kiểm soát nhiệt TRƯỚC KHI THI CÔNG (mục 6.1.2), trong đó tính toán ΔTmax, Tmax, Thb dự kiến theo giới hạn tra bảng tại mục 5
Cơ chế loại trừ	Không quy định rõ - đạt ngưỡng kích thước coi như thuộc diện BTKL	Cùng kích thước, nếu tính toán/kiểm soát chứng minh không vượt giới hạn thì không còn thuộc diện phải xử lý như BTKL

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp từ TCVN 9341:2012 [3] (mục 4) và TCVN 14334:2025 [1] (mục 3.1, 4, 5).

Bảng 1 cho thấy điểm cốt lõi là chuyển từ kiểm tra phản ứng trong thi công (TCVN 9341:2012) sang yêu cầu bắt buộc lập phương án kiểm soát nhiệt tính toán trước thi công (TCVN 14334:2025) cho mọi cấu kiện có nguy cơ nứt nhiệt. Kích thước chỉ còn là chỉ dẫn tham khảo ban đầu thay vì căn cứ tự thân.

Hiểu không thống nhất dễ gây bối rối trong kiểm soát chất lượng (như bệ móng, dầm/sàn chuyển, mố trụ dưới ngưỡng cũ nhưng vượt giới hạn nhiệt mới [4]), làm phát sinh chi phí hoặc vướng nghiệm thu nếu hồ sơ thiếu phương án tính toán nhiệt và nhật ký quan trắc theo quy định mới.

Nghiên cứu tập trung giải quyết hai vấn đề: (i) nhận diện đúng nhóm cấu kiện thuộc diện BTKL theo TCVN 14334:2025 so với TCVN 9341:2012; và (ii) giải pháp ứng xử phù hợp cho nhà thầu ở các giai đoạn thiết kế, đấu thầu, thi công nhằm đảm bảo chất lượng và hiệu quả kinh tế.

Phạm vi bài báo tập trung vào nhóm cấu kiện nằm trong 'vùng giao thoa' giữa hai tiêu chuẩn – kích thước nhỏ hơn 2,0 m nhưng thuộc diện sàng lọc nhiệt mới - dựa trên số liệu thực nghiệm đề tài cấp Bộ Xây dựng RD 41-19 [4] để làm rõ bản chất và đề xuất giải pháp.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Vấn đề và rủi ro bê tông khối lớn

Theo TCVN 14334:2025 (mục 3.1) [1], BTKL là kết cấu có kích thước đủ lớn mà nếu không có biện pháp phòng ngừa thích hợp thì tích tụ nhiệt thủy hóa và thay đổi thể tích kèm theo có thể gây nứt. Bản chất quy định là sàng lọc rủi ro: nứt là nguy cơ có điều kiện, phụ thuộc mức độ ràng buộc biến dạng và bài toán nhiệt cụ thể của cấu kiện.

TCVN 14334:2025 (mục 4) giữ ngưỡng kích thước tham khảo: dạng tấm dày ≥ 0,8 m và các dạng khác có kích thước nhỏ nhất ≥ 1,2 m thấp hơn đáng kể so với ngưỡng 2,0 m của TCVN 9341:2012 [3]. Điều này mở rộng diện cấu kiện cần sàng lọc nhiệt trước khi quyết định biện pháp thi công.

Đề tài cấp Bộ Xây dựng RD 41-19 [4] (Chương 2) đã khảo sát trường nhiệt độ thực tế tại 10 khối bê tông thuộc 8 công trình (gồm 6 khối bê tông thường và 4 khối bê tông đầm lăn RCC), tóm lược ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả khảo sát trường nhiệt độ tại 10 khối bê tông thực tế trong đề tài RD 41-19

Dạng công trình & địa điểm	Kích thước	Cấp bê tông	Thb (°C)	Tmax (°C)	ΔTmax (°C)	Đánh giá rủi ro nứt
Cột công trình cao tầng (Hà Nội)	2,0×2,0×3,7 m	B30	22	71	29	Rủi ro cao nếu không cách nhiệt
Móng bè silo công nghiệp (TP.HCM)	Móng bè, V≈1.900 m^3 (không nêu KT dài×rộng×cao)	C35/45 (B45)	28	67,8	18	An toàn
Mockup móng trụ điện gió (Trà Vinh)	2,0×2,0×2,0 m (khối mockup)	C35/45 (B45)	30	68,5/64,7	10	An toàn
Móng tháp cao tầng - Block A (Hà Nội)	Không nêu cụ thể trong báo cáo	M700R56 (~B50)	30	76,7	17 (cục bộ 2 điểm: 24)	Vượt Tmax; ΔTmax cục bộ vượt (rủi ro không nhiều theo báo cáo gốc)
Móng tháp cao tầng - Block B (Hà Nội)	Không nêu cụ thể trong báo cáo	M700R56 (~B50)	30	73,9	18,7	Vượt Tmax; ΔTmax đạt yêu cầu
Móng tháp cao tầng - Block C (Hà Nội)	Không nêu cụ thể trong báo cáo	M700R56 (~B50)	30	73,4	18,9 (cục bộ 2 điểm: 26,7)	Vượt Tmax; ΔTmax cục bộ vượt, có rủi ro nứt
Đập thủy lợi, thủy điện - RCC (Sơn La)	Đập cao 46 m, dài 162,2 m (khối đổ không nêu cụ thể)	~M150–M250	21-35	44–56	18,8-24,8	Tmax an toàn; một số đợt vượt ΔTmax
Cống xả đập thủy lợi - RCC (Nghệ An)	Thuộc đập dài 221 m, cao >45 m (khối đổ không nêu cụ thể)	M250	16-26	48-49	18,8-23,4	Tmax an toàn; có đợt vượt ΔTmax
Đập tràn đập thủy lợi - RCC (Nghệ An)	Thuộc đập dài 221 m, cao >45 m (khối đổ không nêu cụ thể)	M250	24-30	45,5–51,2	18–24,5	Tmax an toàn; nhiều đợt vượt ΔTmax
Đập thủy lợi - RCC (Bình Định)	Khối đổ bãi rải thử; đập cao 66,5 m, dài 353 m	RCC, XM 70 kg/m^3	29,2-30,8	37,8	11,3	An toàn - ΔTmax thấp

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp từ Báo cáo tổng kết đề tài RD 41-19 [4], Chương 2. Tên công trình được ghi theo dạng kết cấu và địa điểm; kích thước được giữ theo số liệu trong báo cáo gốc. Ô ghi "không nêu cụ thể" tương ứng với trường hợp báo cáo chỉ cung cấp mặt bằng hoặc mặt cắt bố trí đầu đo mà không ghi rõ trị số kích thước.

Kết quả Bảng 2 cho thấy: ở 6 khối bê tông thường, nhiệt độ hỗn hợp khi đổ Thb thực đo vượt 25°C ở 5/6 khối; Tmax vượt 70°C ở 4/6 khối. Chênh lệch nhiệt độ tâm-bề mặt ΔTmax cơ bản kiểm soát dưới 25°C nhờ cách nhiệt chủ động, riêng khối cột đạt 29°C do không bọc bảo ôn - cho thấy rủi ro nứt nhiệt xuất hiện ngay cả ở cấu kiện kích thước vừa phải nếu không có giải pháp kiểm soát nhiệt thích hợp [4].

Để xác định ngưỡng kích thước hợp lý, Chương 5 đề tài RD 41-19 [4] đã khảo sát 8 cấu kiện thực tế theo tiêu chí ACI 301-16 (Bảng 3).

Bảng 3. Kết quả xác định kích thước kết cấu có thể xem là "khối lớn" qua 8 cấu kiện thực tế theo tiêu chí ACI 301-16 (Chương 5, đề tài RD 41-19)

Cấu kiện & địa điểm	Kích thước	Tmax (°C)	ΔTmax tâm–mặt (°C)	ΔTmax khối–môi trường (°C)	Đánh giá theo ACI 301-16 [5]
Sàn tầng hầm nhà cao tầng (TP.HCM)	B30, dày 0,6 m	50,3	7,6	19,5	Không phải khối lớn
Sàn tầng hầm nhà cao tầng (TP.HCM)	B30, dày 1,0 m	61,6	19	30,6	Khối lớn
Sàn chuyển trung tâm TM-CC-KS (Bắc Ninh) - lớp dưới	B50, dày 1,1 m	77,5	21,9	50,7	Khối lớn
Sàn chuyển trung tâm TM-CC-KS (Bắc Ninh) - lớp trên	B50, dày 1,1 m	78,5	22	46,5	Khối lớn
Cột công trình cao tầng (Hà Nội) (*)	B30, 2,0×2,0×3,7 m	71	28	50	Khối lớn
Móng cẩu tháp nhà cao tầng (Hà Nội)	M300, mặt bằng 7,4×7,4 m, dày 1,8 m	69,7	14,8	41	Khối lớn (theo ΔT khối-môi trường)
Dầm chuyển khách sạn (Hạ Long) - dầm 1	B45, rộng 1,8 m, cao 3,0 m, dài 11,33 m	68,8	14,4	48,7	Khối lớn (theo ΔT khối-môi trường)
Dầm chuyển khách sạn (Hạ Long) - dầm 2	B45, rộng 1,5 m, cao 3,0 m, dài 15,5 m	64,7	9,2	43,8	Khối lớn (theo ΔT khối-môi trường)

Nguồn: nhóm tác giả tổng hợp từ Báo cáo tổng kết đề tài RD 41-19 [4], Chương 5 (mục 5.2.2 và phần Nhận xét kết quả nghiên cứu Chương 5). (*) Cùng một khối bê tông với dòng "Cột công trình cao tầng (Hà Nội)" ở Bảng 2, được phân tích bổ sung theo tiêu chí ACI 301-16 [5] ở Chương 5.

Bảng 3 cho thấy 7/8 cấu kiện có kích thước nhỏ nhất chỉ 1,0 - 2,0 m (dưới ngưỡng 2,0 m của TCVN 9341:2012) vẫn được đánh giá là khối lớn theo tiêu chí chênh lệch nhiệt độ hoặc nhiệt độ khối so với môi trường. Từ đó, đề tài RD 41-19 kiến nghị ngưỡng nhận diện tham khảo 0,8 m cho dạng tấm và 1,2 m cho dạng khác - hoàn toàn tương đồng với mục 4 của TCVN 14334:2025 [1]. Đây chính là cơ sở thực nghiệm xác lập 'vùng giao thoa' mà nghiên cứu tập trung giải quyết.

Điểm khác biệt cụ thể giữa hai tiêu chuẩn theo từng khâu - vật liệu, thi công, nghiệm thu - được tổng hợp ở Bảng 4.

Bảng 4. So sánh yêu cầu kỹ thuật giữa TCVN 9341:2012 và TCVN 14334:2025 theo từng khâu

Khâu	TCVN 9341:2012 (TCXDVN 305:2004) [3]	TCVN 14334:2025 [1]
Vật liệu, cấp phối	Quy định chung về hạn chế nứt do nhiệt, không cụ thể hóa yêu cầu chọn xi măng/phụ gia khoáng theo tính toán nhiệt	Yêu cầu cụ thể: ưu tiên xi măng ít tỏa nhiệt, phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng, kiểm soát theo tính toán nhiệt thủy hóa trước khi đưa vào cấp phối chính thức
Thi công	Không bắt buộc phương án trước (xem cơ chế chi tiết ở Bảng 1)	Bắt buộc phương án trước (xem cơ chế chi tiết ở Bảng 1); bổ sung kiểm soát nhiệt độ hỗn hợp, biện pháp làm mát và cách nhiệt cụ thể theo tính toán
Nghiệm thu	Không quy định rõ hồ sơ theo dõi nhiệt độ/vết nứt là điều kiện nghiệm thu bắt buộc	Yêu cầu kiểm tra theo từng giai đoạn: hồ sơ nhật ký theo dõi nhiệt độ, kiểm tra vết nứt và cường độ

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp từ TCVN 9341:2012 [3] và TCVN 14334:2025 [1].

Bản chất TCVN 14334:2025 không phải mở rộng cứng diện BTKL, mà phân định lại căn cứ: kích thước chỉ là điều kiện kích hoạt việc tính toán; quyết định giải pháp kỹ thuật phụ thuộc hoàn toàn vào kết quả tính toán nhiệt và mức độ rủi ro nứt thực tế.

2.2. Giải pháp

TCVN 14334:2025 quy định đồng bộ các biện pháp kiểm soát nhiệt từ khâu thiết kế thành phần bê tông (ưu tiên xi măng ít tỏa nhiệt, tro bay, xỉ hạt) đến bảo dưỡng, cách nhiệt và thời điểm tháo ván khuôn. Để ứng dụng hiệu quả, nhà thầu cần công cụ sàng lọc nhanh trước khi lập biện pháp chi tiết.

Việc sàng lọc dựa trên số liệu thực nghiệm nhiệt thủy hóa xi măng và mức tăng nhiệt độ đoạn nhiệt Tđn của đề tài RD 41-19 [4], phản ánh đặc tính vật liệu thực tế tại Việt Nam.

Thực nghiệm trên 48 mẫu bê tông cấp B30-B70 của RD 41-19 [4] (Chương 4) cho thấy việc sử dụng phụ gia khoáng (tro bay 15 - 30%) giúp giảm đáng kể nhiệt độ đoạn nhiệt cực đại Tđn (Bảng 5). Đây là cơ sở quan trọng để điều chỉnh cấp phối trong quy trình xử lý rủi ro nhiệt.

2.2.1. Số liệu thí nghiệm nhiệt thủy hóa và đoạn nhiệt

Bảng 5. Số liệu thí nghiệm đoạn nhiệt (Tđn) theo cấp bê tông và tỷ lệ tro bay, xi măng PCB40

Cấp bê tông	Tro bay 0% - Tđn (°C)	Tro bay 15% - Tđn (°C)	Tro bay 30% - Tđn (°C)
B30	47	42	39
B40	52	48	42
B50	59	55	51
B60	62	58	55
B70	64	60	57

Nguồn: Trích từ Bảng 3.3–3.5, Chương 4, Báo cáo tổng kết đề tài RD 41-19 [4] (48 mẫu bê tông cấp B30–B70, xi măng PCB40). Cấp B35 dùng trong mô hình tính toán không có số liệu đo trực tiếp; giá trị Tđn cấp B35 được nội suy tuyến tính giữa B30 và B40: 49,5°C (0% tro bay), 45,0°C (15%), 40,5°C (30%).

2.2.2. Phương pháp tính toán sàng lọc nhanh cho nhóm cấu kiện "vùng giao thoa"

Để sàng lọc nhanh kết cấu vùng giao thoa, nhóm tác giả ứng dụng mô hình truyền nhiệt 2D không dừng giải phương trình dẫn nhiệt vi phân, kết hợp đường sinh nhiệt thủy hóa hiệu chỉnh theo thực nghiệm Bảng 6.

$\Delta T đn = (qi \cdot X) / (c0 \cdot \gamma 0)$

Nhiệt phát sinh do thủy hóa xi măng được xác định qua hàm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt $\theta(\tau) = \theta max \cdot (1 - e^{\wedge}(-a \cdot \tau^b))$, với tham số θmax được hiệu chỉnh theo thực nghiệm của đề tài RD 41-19 [4] cho từng cấp bê tông và hàm lượng phụ gia khoáng.

$\rho c \cdot \partial T/\partial t = k \cdot (\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2) + Q(t)$

trong đó Q(t) – tốc độ sinh nhiệt do thủy hóa xi măng – suy ra từ đường cong tăng nhiệt đoạn nhiệt dạng hàm mũ kinh nghiệm, quen thuộc trong các nghiên cứu về bê tông khối lớn [7],[18]:

$\theta(\tau) = \theta max \cdot (1 - e^{\wedge}(-a \cdot \tau^b))$

Mô hình tính toán xét điều kiện biên trao đổi nhiệt thực tế qua ván khuôn hoặc lớp cách nhiệt với môi trường, cho phép dự báo đồng thời nhiệt độ tâm cực đại Tmax và chênh lệch nhiệt độ tâm-bề mặt ΔTmax theo thời gian.

Mô hình được áp dụng khảo sát cho dải kích thước vùng giao thoa: dạng bản (dày 0,8 - 1,5 m) và dạng khối/cột (cạnh 1,2 - 1,5 m, cao 2,0 m) với hai cấp bê tông phổ biến B35 và B40 (thông số đầu vào nêu tại Bảng 6).

Quá trình tính toán sàng lọc mô phỏng trên 24 trường hợp (12 cấu kiện × 2 cấp bê tông) qua 3 bước điều chỉnh liên tiếp: (1) Trạng thái đổ ban đầu; (2) Giảm nhiệt độ đổ Thb xuống 28°C kết hợp bọc giữ nhiệt bề mặt; (3) Tăng 15% tro bay giảm nhiệt thủy hóa. (Ghi chú: Chi tiết toàn bộ 66 trường hợp tính toán số trị của hai bộ dữ liệu mô phỏng cấp B35 (Tlim = 70°C, ΔTlim = 25,5°C) và B40 (Tlim = 70°C, ΔTlim = 26,0°C) được nhóm tác giả lưu giữ trong hồ sơ nghiên cứu và được tổng hợp cô đọng thành kết quả phân loại rủi ro tại Bảng 7 và Bảng 8).

Bảng 6. Bộ thông số đầu vào dùng cho tính toán sàng lọc nhiệt (bước 1) đối với nhóm cấu kiện vùng giao thoa

Cấu kiện	Kích thước hình học W×H×L (m)	Điều kiện biên (mặt để hở)
Bản dày 0,8 m	6,0×0,8×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 0,9 m	6,0×0,9×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,0 m	6,0×1,0×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,1 m	6,0×1,1×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,2 m	6,0×1,2×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,3 m	6,0×1,3×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,4 m	6,0×1,4×6,0	Mặt trên và đáy
Bản dày 1,5 m	6,0×1,5×6,0	Mặt trên và đáy
Khối/cột cạnh 1,2 m	1,2×2,0×1,2	Khối tự do (mọi mặt)
Khối/cột cạnh 1,3 m	1,3×2,0×1,3	Khối tự do (mọi mặt)
Khối/cột cạnh 1,4 m	1,4×2,0×1,4	Khối tự do (mọi mặt)
Khối/cột cạnh 1,5 m	1,5×2,0×1,5	Khối tự do (mọi mặt)

Nguồn: Nhóm tác giả giả định phục vụ tính toán sàng lọc. Thông số áp dụng chung cho toàn bộ 12 cấu kiện và hai cấp bê tông B35/B40: θmax bước 1 (0% tro bay, theo Bảng 5) = 49,5°C (B35) / 52°C (B40); nhiệt độ hỗn hợp khi đổ Thb = 30°C; nhiệt độ môi trường Tenv = 32°C; che phủ bước 1 = ván khuôn gỗ.

Từ kết quả tính toán chi tiết, mức độ đáp ứng giới hạn nhiệt được phân hóa rõ rệt: cấu kiện bản mỏng B35 (0,8 - 0,9 m) đạt ngưỡng ngay ở bước 1 mà không cần giải pháp đặc biệt; đa số cấu kiện bản 1,0 - 1,5 m (B35) và 0,8 - 1,2 m (B40) đạt sau khi áp dụng bước 2 hoặc bước 3 (xếp loại rủi ro vừa); trong khi các cấu kiện bản dày trên 1,3 m cấp B40 và khối/cột vẫn vượt nhẹ giới hạn sau cả 3 bước (xếp loại rủi ro cao), đòi hỏi phải áp dụng biện pháp BTKL chuyên biệt.

2.2.3. Quy trình xử lý theo kết quả sàng lọc

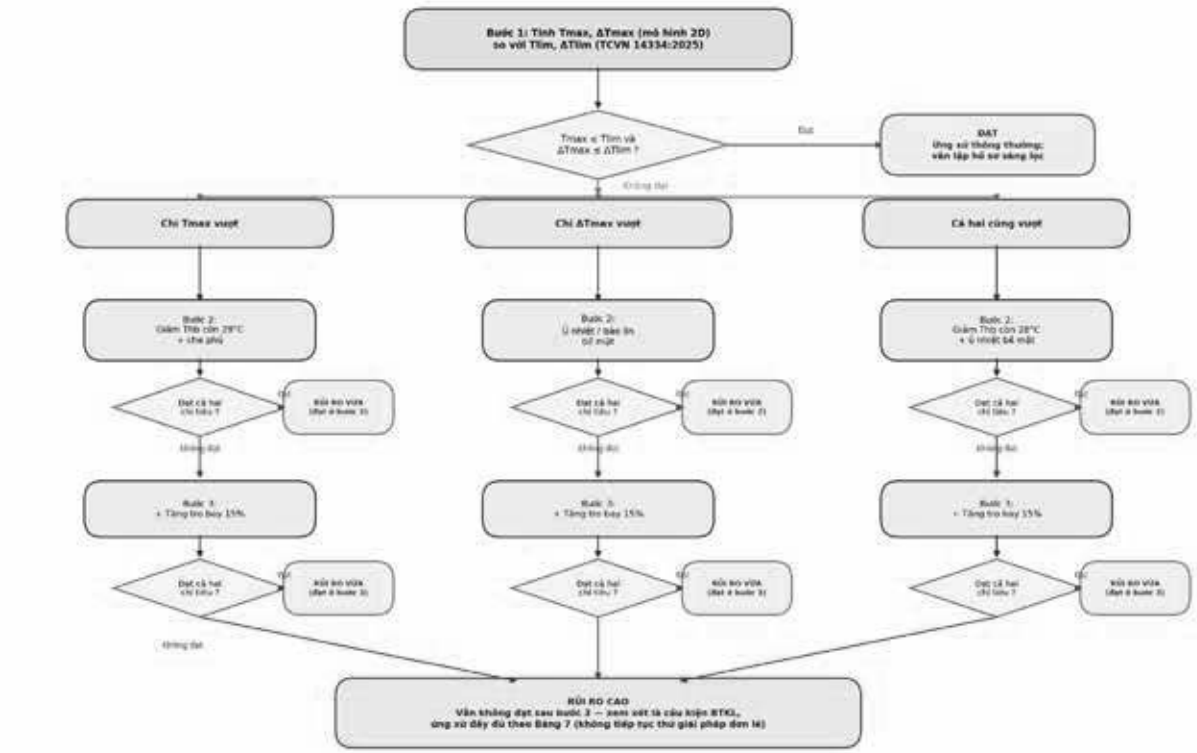
Từ kết quả trên, nhóm tác giả đề xuất quy trình sàng lọc và xử lý nhanh 3 bước theo Bảng 7 và lưu đồ Hình 1, giúp nhà thầu nhanh chóng xác định cấp độ rủi ro và biện pháp kỹ thuật tương ứng.

Bảng 7. Trình tự kiểm tra và xử lý theo kết quả sàng lọc nhanh

Bước	Điều kiện kiểm tra	Kết luận	Hành động đề xuất
1	Tmax ≤ Tlim và ΔTmax ≤ ΔTlim	Đạt	Ứng xử như cấu kiện thông thường; vẫn lập hồ sơ tính toán/sàng lọc lưu nghiệm thu theo TCVN 14334:2025 [1] (mục 6.1.2).
2	Không đạt bước 1 - xác định đúng chỉ tiêu vượt	Xử lý bước 2	Chỉ Tmax vượt: giảm Thb còn 28°C + che phủ (mục 6.5, 6.3 - Bảng 7). Chỉ ΔTmax vượt: ủ nhiệt/bảo ôn bề mặt (mục 6.7, 6.9, 6.10 - Bảng 7). Cả hai cùng vượt: phối hợp đồng thời hai biện pháp trên. Đạt cả hai chỉ tiêu → Rủi ro vừa, dừng lại.
3	Vẫn không đạt sau bước 2	Xử lý bước 3	Bổ sung tăng tro bay lên 15% (mục 6.3, 6.4 - Bảng 7), giữ nguyên biện pháp đã áp dụng ở bước 2. Đạt cả hai chỉ tiêu → Rủi ro vừa, dừng lại.
—	Vẫn không đạt sau bước 3	Rủi ro cao	Xem xét ứng xử như cấu kiện BTKL điển hình (mục 6.3–6.12 - Bảng 7); không tiếp tục thử giải pháp đơn lẻ, chuyển sang tính toán/thí nghiệm chi tiết riêng cho cấu kiện.

Nguồn: Nhóm tác giả đề xuất dựa trên kết quả tính toán sàng lọc nhiệt và ngưỡng giới hạn TCVN 14334:2025 [1].

Trình tự kiểm tra được minh họa bằng lưu đồ ở Hình 1.



Hình 1. Lưu đồ trình tự kiểm tra và xử lý theo kết quả sàng lọc nhanh (tương ứng Bảng 7)

Quy trình tại Bảng 7 phục vụ việc phân loại mức độ rủi ro theo dải kích thước - tổng hợp ở Bảng 8, làm cơ sở đề xuất ứng xử theo giai đoạn dự án ở mục 2.3.

Bảng 8. Phân loại mức độ rủi ro theo dải kích thước cấu kiện (tổng hợp từ kết quả tính toán sàng lọc nhiệt)

Mức rủi ro	Bản - B35	Bản - B40	Khối/cột - B35	Khối/cột - B40	Giải pháp đề xuất
Đạt	0,8-0,9 m	—	—	—	Ứng xử thông thường; vẫn lập hồ sơ sàng lọc lưu nghiệm thu
Rủi ro vừa (đạt sau bước 2 hoặc 3)	1,0-1,5 m	0,8–1,2 m	1,2–1,5 m	—	Áp dụng giải pháp sơ bộ theo Bảng 10 (giảm Thb/ủ nhiệt, có thể kèm tăng tro bay)
Rủi ro cao (vẫn không đạt sau bước 3)	—	1,3–1,5 m	—	1,2–1,5 m	Ứng xử đầy đủ như cấu kiện BTKL điển hình (mục 6.3–6.12 - Bảng 7)

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp trực tiếp từ kết quả tính toán sàng lọc nhiệt B35 và B40 theo lưu đồ Hình 1.

Kết quả áp dụng cho hình học, cấp phối và điều kiện giả định ở Bảng 6 - các công trình có điều kiện khác cần sàng lọc lại bằng mô hình tương tự.

Kết quả phân loại tại Bảng 8 là cơ sở khoa học để các bên chủ động phân bổ nguồn lực và xác lập trách nhiệm theo từng giai đoạn triển khai dự án.

2.3. Đề xuất ứng xử với nhóm cấu kiện theo từng giai đoạn dự án

Nhóm cấu kiện vùng giao thoa cần được ứng xử phù hợp qua ba giai đoạn: thiết kế, đấu thầu và thi công.

a) Giai đoạn thiết kế

Ở giai đoạn thiết kế, Chủ đầu tư và Tư vấn thiết kế cần chủ động rà soát, lập danh mục cấu kiện vùng giao thoa kèm yêu cầu kiểm soát nhiệt cụ thể; đồng thời xem xét tối ưu kích thước hoặc chia nhỏ khối đổ nếu không ảnh hưởng khả năng chịu lực nhằm giảm chi phí kiểm soát nhiệt.

b) Giai đoạn đấu thầu

Ở giai đoạn đấu thầu, nhà thầu cần làm rõ hồ sơ mời thầu về danh mục và yêu cầu nhiệt của cấu kiện vùng giao thoa; chủ động áp dụng quy trình sàng lọc để dự toán đầy đủ chi phí biện pháp (làm mát hỗn hợp, bảo ôn, quan trắc), tránh phát sinh chi phí hoặc rủi ro pháp lý.

c) Giai đoạn thi công

Ở giai đoạn thi công, nhà thầu lập kế hoạch tổng thể kiểm soát nhiệt cho toàn bộ dự án; tiến hành sàng lọc phân loại rủi ro (Bảng 8) để ưu tiên nguồn lực; lập phương án kiểm soát nhiệt chi tiết trình duyệt trước khi đổ và tổ chức quan trắc nghiệm thu đầy đủ theo TCVN 14334:2025.

Bảng 9. Tổng hợp việc cần làm theo giai đoạn dự án đối với nhóm cấu kiện thuộc vùng giao thoa

Giai đoạn	Việc cần làm	Căn cứ / công cụ	Sản phẩm đầu ra
Thiết kế	CĐT/TV QLDA làm việc với TVTK để đưa yêu cầu cụ thể hơn TCVN; tối ưu kích thước cấu kiện nếu không ảnh hưởng chịu lực, công năng	Bản vẽ kết cấu; TCVN 14334:2025 [1] mục 3.1, 4	Danh mục cấu kiện vùng giao thoa kèm yêu cầu kiểm soát nhiệt cụ thể
Đấu thầu	Làm rõ, xin chỉ dẫn từ bên mời thầu; chủ động đề xuất kỹ thuật - kinh tế, tham khảo cách sàng lọc của nghiên cứu	Bảng 7, 8; hồ sơ mời thầu	Đề xuất kỹ thuật - kinh tế có giả thiết và biện pháp rõ ràng
Thi công	Lập kế hoạch tổng thể dự án; sàng lọc, phân nhóm cấu kiện theo mức rủi ro; thực hiện đầy đủ theo TCVN cho từng cấu kiện	TCVN 14334:2025 [1] mục 6.1.2, 6.2–6.12; Bảng 7	Kế hoạch tổng thể; phương án kiểm soát nhiệt được duyệt theo từng cấu kiện; hồ sơ quan trắc, nghiệm thu

Nguồn: Nhóm tác giả đề xuất, tổng hợp từ nội dung mục 2.2 và 2.3.

3. KẾT LUẬN

TCVN 14334:2025 đã chuyển đổi căn bản phương thức quản lý bê tông khối lớn từ kiểm soát thụ động theo kích thước sang kiểm soát chủ động theo rủi ro tính toán nhiệt. Các bên liên quan cần nắm vững bản chất này để vận dụng linh hoạt, hiệu quả.

Mô hình tính toán sàng lọc dựa trên số liệu thực nghiệm đề tài RD 41-19 cung cấp công cụ định lượng hỗ trợ nhận diện và phân nhóm rủi ro kết cấu vùng giao thoa, làm cơ sở lựa chọn giải pháp kỹ thuật tối ưu kinh tế - kỹ thuật.

Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất trình tự ứng xử theo ba giai đoạn: thiết kế, đấu thầu và thi công, giúp Chủ đầu tư, Tư vấn thiết kế và Nhà thầu chủ động xác định yêu cầu, dự trù nguồn lực, tổ chức kiểm soát nhiệt và hoàn thiện hồ sơ phục vụ nghiệm thu theo tiêu chuẩn mới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 14334:2025. Kết cấu bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2025.

[2] Chính phủ. Nghị định số 207/2026/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng, 2026.

[3] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9341:2012 (TCXDVN 305:2004). Bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu, NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2012.

[4] Bộ Xây dựng. Hội Kết cấu và Công nghệ Xây dựng Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài RD 41-19: Nghiên cứu giải pháp kỹ thuật thi công bê tông khối lớn (Phần 1 và Phần 2), Hà Nội, 2019.

[5] ACI Committee 301. Specifications for Structural Concrete (ACI 301-16). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2016.

[6] ACI Committee 116. Cement and Concrete Terminology (ACI 116R / ACI CT-23). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2023.

[7] ACI Committee 207. Guide to Mass Concrete (ACI 207.1R). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2005.

[8] Canadian Standards Association. Concrete Materials and Methods of Concrete Construction (CSA A23.1). CSA Group, Mississauga, Ontario, Canada, 2019.

[9] European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 3: Liquid Retaining and Containment Structures (EN 1992-3). CEN, Brussels, 2006.

[10] P. Bamforth. Early-age Thermal Crack Control in Concrete (CIRIA Report C660). Construction Industry Research and Information Association, London, UK, 2007.

[11] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 7712:2013 - Xi măng poóc lăng hỗn hợp ít tỏa nhiệt. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2013.

[12] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6069:2007 - Xi măng poóc lăng ít tỏa nhiệt. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2007.

[13] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 10302:2014 - Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2014.

[14] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 11586:2016 - Xỉ hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2016.

[15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 8827:2011 - Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silica fume và tro trấu nghiền mịn. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2011.

[16] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6070:2005 - Xi măng - Phương pháp xác định nhiệt thủy hóa. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2005.

[17] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 8828:2011 - Bê tông - Yêu cầu bảo dưỡng ẩm tự nhiên. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2011.

[18] ACI Committee 207. Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2R). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2007.

■Ngày nhận bài: 16/7/2026 ■Ngày sửa bài: 06/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2026

Bất định do mô hình hóa sàn CLT trong đáp ứng gió của nhà cao tầng khung-giằng thép

Model-form uncertainty due to CLT floor idealisation in the wind response of a steel braced-frame tall building

> NGUYỄN LÊ MINH THÔNG[1,2], NGUYỄN NHỰT DUY[2], NGUYỄN QUỐC HUY[3], NGUYỄN ĐỨC TIẾN[1,2], VŨ HỒ NAM[2,*]
[1]Viện Sau đại học, Trường Đại học Văn Lang
[2]Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ Văn Lang, Trường Đại học Văn Lang
[3]Khoa Kỹ thuật ứng dụng, Trường Đại học Văn Hiến
*Email: nam.vh@vlu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu lượng hóa độ nhạy của đáp ứng gió với cách lý tưởng hóa sàn gỗ ép chéo (cross-laminated timber, CLT) trong nhà cao tầng khung-giằng thép. Ba cấu hình được so sánh trên cùng hình học, khối lượng và thông số gió nền: mô hình không xét độ cứng sàn, mô hình sàn CLT dùng phần tử shell đàn hồi và mô hình sàn cứng tuyệt đối trong mặt phẳng. Phân tích phần tử hữu hạn kết hợp tích phân phổ nhiều dạng dao động xác định đặc trưng động lực học, chuyển vị mái và gia tốc căn trung bình bình phương (root-mean-square, RMS). Hội tụ lưới được kiểm tra bằng tinh chỉnh kích thước phần tử. Các khảo sát riêng về tính trực hướng, biến dạng cắt ngang và độ mềm liên kết định lượng độ nhạy đối với các giả thiết mô hình. Trong miền tham số khảo sát, cách lý tưởng hóa sàn chi phối mức biến thiên của chu kỳ và chuyển vị, trong khi tỷ số cản tác động mạnh hơn đến gia tốc. Mô hình sàn cứng tái hiện gần đúng chu kỳ và gia tốc của mô hình sàn CLT đàn hồi nhưng dự báo chuyển vị thấp hơn. Kết quả xác định đại lượng đáp ứng nhạy với từng giả thiết và hỗ trợ lựa chọn mô hình sàn cho phân tích gió của hệ khung–giằng thép sử dụng sàn CLT.

Từ khóa: Gỗ ép chéo (CLT); nhà cao tầng; khung-giằng thép; lý tưởng hóa sàn; đáp ứng động do gió; bất định mô hình.

ABSTRACT

This study quantifies the sensitivity of wind response to floor idealisation in a steel braced-frame tall building with cross-laminated timber (CLT) floors. Three configurations share identical geometry, mass, and background wind parameters: a model without floor stiffness, a CLT-floor model with elastic shell elements, and an in-plane rigid-diaphragm model. Finite-element analysis and multimode spectral integration determine modal properties, roof displacement, and root-mean-square (RMS) acceleration. Mesh refinement verifies discretisation convergence, while separate analyses quantify sensitivity to orthotropy, transverse-shear deformation, and connection flexibility. Within the investigated parameter range, floor idealisation governs the variation in periods and displacements, whereas damping more strongly influences acceleration. The rigid-diaphragm model closely reproduces the periods and accelerations of the elastic CLT-floor model but predicts lower displacements. The findings identify the responses most sensitive to each assumption and support floor-model selection for wind analysis of steel braced frames with CLT floors.

Keywords: Cross-laminated timber (CLT); tall building; steel braced frame; floor idealisation; dynamic wind response; model-form uncertainty.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gỗ kỹ thuật giúp giảm tĩnh tải, hỗ trợ tiền chế và có tiềm năng giảm phát thải carbon trong công trình cao tầng [1, 2]. Nhờ cấu trúc các lớp vuông góc, gỗ ép chéo CLT có độ ổn định kích thước, làm việc theo hai phương và có thể chế tạo thành tấm kích thước lớn [1, 3, 4]. Đáp ứng gió của hệ khung-giằng thép sử dụng sàn CLT phụ thuộc đồng thời vào độ cứng ngang, khối lượng, đặc trưng dao động và tỷ số cản [5 - 7].

Trong mô hình công trình, giả thiết sàn cứng tuyệt đối trong mặt phẳng triệt tiêu biến dạng màng, còn shell đàn hồi cho phép sàn biến dạng và phân phối lực giữa các cấu kiện chịu lực ngang. Sự khác biệt này tác động trực tiếp đến chu kỳ và chuyển vị; tỷ số cản lại chi phối mức khuếch đại cộng hưởng và gia tốc. Vai trò của tải trọng gió và tỷ số cản đã được ghi nhận trong thiết kế công trình Treet 14 tầng [8].

Việc quy đổi tấm CLT nhiều lớp thành shell tương đương phụ thuộc vào cấu hình lớp, hướng sợi, chiều dày và điều kiện liên kết [1, 4, 9, 10]. Ở Việt Nam, ảnh hưởng của mô hình sàn trong ETABS đến đáp ứng động của nhà nhiều tầng đã được khảo sát [11]. Mô

hình phần tử hữu hạn của liên kết gỗ–chốt thép cũng đã được đối chiếu với thí nghiệm [12]. Các tài liệu trong nước nêu trên chưa định lượng đồng thời ảnh hưởng của cách lý tưởng hóa sàn CLT, độ mềm liên kết sàn-khung và tỷ số cản đến đáp ứng gió.

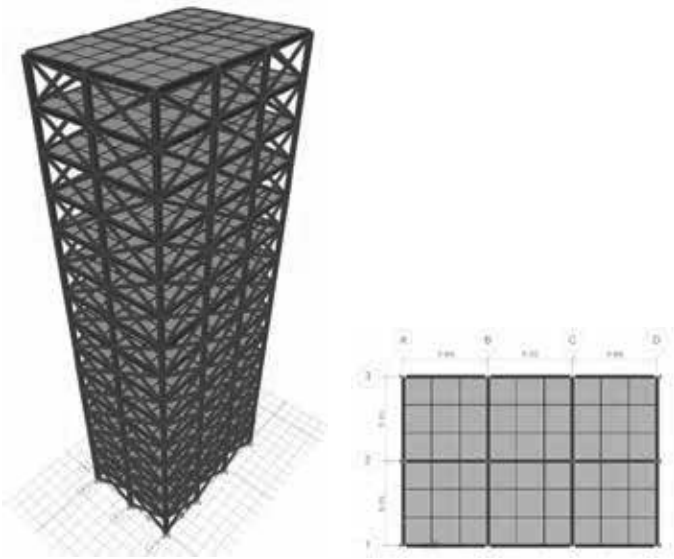
Nghiên cứu lượng hóa độ nhạy của chu kỳ, chuyển vị mái và gia tốc RMS đối với bốn yếu tố: cách lý tưởng hóa sàn, độ cứng shell, liên kết sàn-khung và tỷ số cản. Độ phân tán đáp ứng giữa các cấu hình tất định được dùng làm thước đo độ nhạy đối với bất định dạng mô hình, không nhằm xây dựng phân bố xác suất của sai số mô hình. Các cấu hình dùng chung hình học, khối lượng và thông số gió nền để tách ảnh hưởng của cách biểu diễn độ cứng sàn; ảnh hưởng của tỷ số cản được khảo sát riêng.

2. MÔ HÌNH KHẢO SÁT VÀ THIẾT LẬP PHÂN TÍCH

2.1. Mô hình và tải trọng

Mô hình khảo sát là nhà văn phòng 15 tầng, mặt bằng 18 m × 12 m, chiều cao tầng 3,6 m và tổng chiều cao 54 m. Hệ khung-giằng thép chịu lực ngang; sàn CLT dày 175 mm sử dụng cấu hình E1 theo tiêu chuẩn ANSI/APA PRG 320-2018 [3]. Hình học, tiết diện và khối lượng không thay đổi giữa các cấu hình.

Mặt bằng gồm ba nhịp 6 m theo X và hai nhịp 6 m theo Y (Hình 1). Các cấu hình giữ nguyên hệ khung–giằng và điều kiện biên; cách biểu diễn độ cứng sàn là biến mô hình chính.



(a) Mô hình không gian *(b) Mặt bằng tầng điển hình*

Hình 1. Mô hình ETABS của nhà khung-giằng thép sử dụng sàn CLT: (a) mô hình không gian; (b) mặt bằng tầng điển hình với lưới trục kết cấu 6 m

Tải trọng gió tuân theo TCVN 2737:2023 [13]. Công trình được giả định đặt tại TP.HCM, thuộc địa hình C. Vận tốc gió tham chiếu trong 3 s với chu kỳ lặp 50 năm bằng 44 m/s theo QCVN 02:2022/BXD [14].

Mô hình ETABS sử dụng hệ đơn vị kN–m–C. Thép có $E = 200$ GPa, $\nu = 0{,}30$ và trọng lượng riêng 78,5 kN/m³. Cột, dầm và giằng lần lượt dùng tiết diện I-500×250×16×10, I-400×200×12×8 và I-250×150×10×6. Giằng X bố trí tại bốn biên công trình; chân cột ngàm và các đầu thanh không giải phóng liên kết. Khối lượng mô hình gồm khung thép, sàn CLT, hoàn thiện, hệ MEP và 25% hoạt tải. Tổng khối lượng tịnh tiến được giữ bằng nhau giữa các mô hình.

2.2. Mô hình shell tương đương của sàn CLT và phân bố khối lượng

PRG 320 cung cấp độ cứng uốn hiệu dụng của cấu hình E1 theo phương chính và phương phụ, được xác định bằng phương pháp tương tự cắt (Shear Analogy) [3]. Trên một đơn vị bề rộng, nghiên cứu lấy các giá trị này làm độ cứng uốn mục tiêu của shell tương đương:

$$D_{\mathrm{eq},i} = (EI)_{\mathrm{eff},f,i}, \qquad i \in \{0^\circ, 90^\circ\} \tag{1}$$

Với chiều dày và hệ số Poisson đã chọn, mô đun đàn hồi tương đương của shell đồng nhất được xác định bằng cách đảo quan hệ độ cứng uốn của tấm:

$$E_{\mathrm{eq},i} = \frac{12(1-\nu^2)D_{\mathrm{eq},i}}{t^3}, \qquad i \in \{0^\circ, 90^\circ\} \tag{2}$$

Trong các công thức (1) và (2), $i = 0^\circ$ và $i = 90^\circ$ lần lượt biểu thị phương chính và phương phụ của tấm CLT.

Với chiều dày $t = 175$ mm và hệ số Poisson $\nu = 0{,}30$, công thức (1) lấy độ cứng uốn hiệu dụng của tấm làm độ cứng mục tiêu, còn công thức (2) xác định mô đun của shell đồng nhất tạo ra cùng độ cứng. Phép quy đổi cho

$E_{\mathrm{eq},0} = 8{,}49$ GPa và $E_{\mathrm{eq},90} = 1{,}70$ GPa.

Chỉ số f trong $(EI)_{\mathrm{eff,f},i}$ biểu thị uốn vuông góc mặt tấm (flatwise) theo PRG 320. Phép tương đương chỉ bảo toàn độ cứng uốn mục tiêu; độ cứng màng, độ cứng cắt và độ mềm mối nối giữa các tấm CLT không được hiệu chỉnh độc lập. Mô hình cơ sở sử dụng $E = 8{,}49$ GPa theo cả hai trục cục bộ như một lý tưởng hóa đẳng hướng ở cấp mô hình công trình. Nhánh trực hướng phục hồi độ tương phản độ cứng theo hai phương để định lượng mức nhạy của đáp ứng đối với giản lược này; các nhánh m_D và m_E lần lượt điều chỉnh độ cứng màng và toàn bộ thành phần độ cứng của shell.

Khối lượng riêng CLT được chọn bằng 480 kg/m³, nằm trong khoảng 400 - 600 kg/m³ thường dùng cho CLT gỗ mềm [4]. Sau khi cộng hoàn thiện, hệ MEP và 25% hoạt tải văn phòng, tổng tải diện tích tham gia dao động bằng 2,949 kN/m², tương ứng 64,949 kN s²/m mỗi tầng. Khối lượng sàn được phân bố tại các nút; trọng lượng riêng của shell đặt bằng 0 để tránh tính lặp. Bảng 1 tổng hợp thông số quy đổi và cách phân bố khối lượng.

Bảng 1. Thông số chính của shell tương đương cho sàn CLT và mô hình phân bố khối lượng

Thông số	Giá trị/cơ sở
Cấu hình CLT	ANSI/APA PRG 320 *E1*, *t* = 175 mm; cơ sở xác định độ cứng hiệu dụng của shell
Độ cứng uốn hiệu dụng theo PRG 320	$(EI)_{eff,f,0}$ = 4166 và $(EI)_{eff,f,90}$ = 836 kN m²/m theo phương chính và phương phụ
Mô đun quy đổi từ dữ liệu PRG 320	$E_{eq,0}$=8.49 và $E_{eq,90}$=1.7 GPa với ν=0.3
Khai báo vật liệu shell trong ETABS	Shell đẳng hướng, *E*=8.49 GPa và ν=0.3; giả thiết tương đương dùng trong mô hình phân tích

Khối lượng riêng vật liệu CLT	480 kg/m^3; tương ứng tải trọng bản thân sàn 0.824 kN/m^2
Tải hoàn thiện, MEP và hoạt tải tham gia dao động	1.0+0.5+25%×2.5=2.125 kN/m^2
Tải trọng diện tích quy đổi vào khối lượng dao động	2.949 kN/m^2 sau khi cộng tải trọng bản thân sàn CLT, hoàn thiện, MEP và phần hoạt tải tham gia dao động
Khối lượng quy đổi từ tải diện tích	0.3007 kN s^2/m^3; dùng để phân phối khối lượng nút từ tải diện tích
Khối lượng quy đổi mỗi tầng	64.949 kN s^2/m; gán tại nút, trong khi shell có trọng lượng riêng bằng 0 để tránh lặp khối lượng sàn CLT
Lưới shell của sàn CLT	9×6 đối tượng diện tích mỗi tầng; ETABS tự chia thành 216 phần tử phân tích mỗi tầng ở lưới 1,0 m

2.3. Các mô hình phân tích và kiểm tra độ nhạy

Ba mô hình chính lần lượt không xét độ cứng sàn, dùng phần tử shell đàn hồi cho sàn CLT và áp đặt sàn cứng tuyệt đối trong mặt phẳng (rigid diaphragm). Mô hình sàn CLT đàn hồi đại diện cho sàn bán cứng vì có độ cứng màng hữu hạn và không áp đặt ràng buộc sàn cứng. Các mô hình giữ cùng tổng khối lượng để tách ảnh hưởng của cách biểu diễn độ cứng.

Nhánh $m_D = 1{,}25/1{,}50/1{,}75$ chỉ nhân độ cứng màng; nhánh $m_E = 0{,}75/0{,}5/0{,}25$ nhân đồng thời độ cứng màng, uốn và cắt, đây là các hệ số nhân độ cứng. Hai nhánh này chỉ khảo sát chuyển vị tĩnh; phân tích dạng dao động và gia tốc sử dụng ba mô hình chính.

Hội tụ lưới được kiểm tra với kích thước phần tử phân tích 2,0; 1,0 và 0,5 m, tương ứng 54, 216 và 864 phần tử phân tích mỗi tầng.

Mô hình trực hướng sử dụng shell một lớp theo [10]. Các giá trị $E_1 = 9{,}159$ GPa, $E_2 = 1{,}838$ GPa, $\nu_{12} = 0{,}3$ và $\nu_{21} = 0{,}0602$ xác định quan hệ đàn hồi trực hướng. Đối với cắt trong mặt phẳng, quan hệ $G_{12} = \sqrt{(E_1E_2)}/[2(1 + \nu_{12})]$ cho $G_{12} = 1{,}578$ GPa. Riêng các mô đun đàn hồi và hệ số Poisson tái tạo $D_1 = 4166$ và $D_2 = 836$ kN m^2/m của cấu hình E1.

Do chưa có dữ liệu thí nghiệm hiệu chỉnh mô đun cắt trong mặt phẳng, G_{12} được gán theo quan hệ chuyển đổi trên và chỉ dùng trong nhánh kiểm tra độ nhạy; giá trị này không được xem là đặc trưng vật liệu đã hiệu chỉnh cho cấu hình sàn CLT cụ thể. Trục vật liệu 1 trùng với phương chính của tấm CLT.

Biến dạng cắt ngang được kiểm tra bằng hai dạng phần tử ShellThin và ShellThick. ShellThin tuân theo lý thuyết Kirchhoff và bỏ qua biến dạng cắt ngang; ShellThick tuân theo lý thuyết Mindlin–Reissner và có xét thành phần này [15, 16]. Đối với ShellThick, $G_{13} = 85{,}7$ MPa và $G_{23} = 102{,}9$ MPa được quy đổi từ độ cứng cắt ngang hiệu dụng $(GA)_{\text{eff}}$ của cấu hình E1 theo PRG 320 [3].

Liên kết sàn-khung được biểu diễn bằng phần tử liên kết tuyến tính. Với đường kính vít $d = 8$ mm, khối lượng riêng gỗ $\rho_m = 480$ kg/m^3 và bước vít $s = 300$ mm, độ cứng tải–trượt sử dụng của một vít là $K_{\text{ser}} = \rho_m^{1,5} d/23$ [4]. Khi ρ_m tính bằng kg/m^3 và d bằng mm, K_{ser} có đơn vị N/mm và biểu thị độ cứng rời rạc của một vít.

Đối với liên kết thép–gỗ, tài liệu cho phép nhân K_{ser} với 2,0; nghiên cứu xét cả hai mức K_{ser} và $2K_{\text{ser}}$. Chia độ cứng của một vít cho bước vít chuyển hệ vít rời rạc thành độ cứng phân bố dọc đường đỡ, $k_{\text{line}} = K_{\text{ser}}/s$, lần lượt bằng 12,19 và 24,39 MN/m^2. Phần tử liên kết thứ i nhận độ cứng $k_i = k_{\text{line}} L_i$, trong đó L_i là chiều dài đường liên kết quy thuộc tại nút. Phép quy đổi này bảo toàn tổng độ cứng của hệ vít.

Mỗi tầng sử dụng 46 phần tử liên kết dọc theo 102 m đường đỡ, tương ứng 340 vít quy đổi. Mô hình xác định chuyển vị tương đối giữa sàn và khung tại hai mức độ cứng. Cấu hình vít này xác lập miền độ cứng cho phân tích độ nhạy; thiết kế liên kết chi tiết cần một mô hình riêng.

3. PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ ĐÁP ỨNG GIÓ

3.1. Đặc trưng dao động và chuyển vị mái

Phân tích dạng dao động xác định $f_r = 1/T_r$, dạng dao động và tỷ lệ khối lượng tham gia U_r. Trong đó, r là số thứ tự dạng và T_r là chu kỳ tương ứng. Dạng 1 chi phối phương Y, còn dạng 2 chi phối phương X. Tích phân phổ chỉ giữ các dạng có tỷ lệ khối lượng tham gia theo phương xét lớn hơn 10^{-5}.

Bảng 2 tổng hợp chu kỳ, tần số và tỷ lệ khối lượng tham gia dùng cho tích phân phổ.

Bảng 2. Chu kỳ, tần số và tỷ lệ khối lượng tham gia của ba mô hình chính

Mô hình	Phương	Dạng	*T (s)*	*f (Hz)*	U_r	ΣU_r tại $r_{\max}$	$r_{\max}$
Không xét độ cứng sàn	Y	1	1.645	0.608	0.593	0.9978	100
Không xét độ cứng sàn	X	2	1.055	0.948	0.586	0.9946	100
Sàn CLT (shell)	Y	1	1.150	0.870	0.705	0.9999	100
Sàn CLT (shell)	X	2	0.855	1.169	0.711	0.9997	100
Sàn cứng	Y	1	1.144	0.874	0.705	1.0000	45
Sàn cứng	X	2	0.853	1.172	0.712	1.0000	45

Trong Bảng 2, U_r và $\sum U_r$ lần lượt là tỷ lệ khối lượng tham gia của dạng đang xét và tỷ lệ lũy tích. Ở mức hội tụ cao nhất của từng mô hình, tỷ lệ lũy tích theo mỗi phương vượt 0,99. Gia tốc RMS được tính từ các dạng thỏa ngưỡng tỷ lệ khối lượng tham gia lớn hơn 10^{-5}.

Dạng dao động chi phối huy động 59,3-70,5% khối lượng theo Y và 58,6-71,2% theo X; các dạng bậc cao bổ sung phần còn lại. Tỷ lệ khối lượng tham gia được tính lại từ khối lượng và dạng dao động tại nút, với sai khác không quá 5×10^{-5} so với kết quả ETABS.

3.2. Tích phân phổ đáp ứng

Thành phần vận tốc nhiễu động theo phương dọc gió được mô hình hóa là một quá trình ngẫu nhiên dừng [17]. Tại cao độ z_j, mật độ phổ công suất một phía tuân theo dạng Kaimal/IEC và được chuẩn hóa để tích phân trên miền tần số dương bằng phương sai vận tốc [18]:

$$S_{u,j}(f) = \sigma_{u,j}^2 \frac{4L_j / V_j}{\left(1 + 6fL_j / V_j\right)^{5/3}} \quad (3)$$

Trong Công thức (3), f là tần số và j chỉ tầng đang xét. Các đại lượng V_j, I_j, $\sigma_{u,j} = I_j V_j$ và L_j lần lượt biểu thị vận tốc trung bình, cường độ nhiễu động, độ lệch chuẩn vận tốc và thang chiều dài nhiễu động tại tầng j.

Các đại lượng khí động thay đổi theo cao độ, nên phổ được xác lập riêng cho từng tầng. Tuyến tính hóa lực dọc gió quanh vận tốc trung bình, kết hợp hàm tương quan phổ dạng mũ theo cao độ, chuyển trường vận tốc thành ma trận phổ chéo lực tầng [19, 20]:

$$\left[S_F(f)\right]_{jk} = Q_j Q_k \sqrt{S_{u,j}(f) S_{u,k}(f)} \exp\left[-\frac{C_z f \,|\, z_j - z_k \,|}{\overline{V}_{jk}}\right] \quad (4)$$

Trong công thức (4), j và k là chỉ số của hai tầng đang xét. Hệ số $Q_j = \rho c_f b \Delta z V_j$ quy đổi dao động vận tốc cục bộ thành dao động lực tuyến tính hóa tại tầng j. Trong đó, c_f là hệ số lực, b là bề rộng đón gió và $\Delta z = 3{,}6$ m là chiều cao tầng.

Đại lượng z_j là cao độ tầng, còn $\overline{V}_{jk} = (V_j + V_k)/2$ là vận tốc trung bình giữa hai tầng. Khối lượng riêng không khí được lấy bằng $\rho = 1{,}25$ kg/m³, trong khi hệ số suy giảm tương quan theo phương đứng được giữ cố định ở $C_z = 10$ như một tham số của mô hình.

Tích của hai hệ số quy đổi và căn bậc hai của tích hai phổ vận tốc xác định biên độ phổ lực giữa cặp tầng; hàm mũ mô tả sự suy giảm tương quan khi khoảng cách đứng tăng. Khi hai chỉ số tầng trùng nhau, hàm tương quan bằng một và phần tử đường chéo trở về mật độ phổ tự của lực tầng [20].

Phổ tại mỗi cao độ sử dụng V_j, I_j và L_j tương ứng; tích phân trên miền tần số dương bằng $\sigma_{u,j}^2$. Sau khi lập ma trận phổ lực, hàm truyền nhiều dạng đưa tải gió ngẫu nhiên tại các tầng về gia tốc mái theo N dạng [19, 20]:

$$h_j(f) = \sum_{r=1}^{N} \frac{-\omega^2 \phi_{jr} \phi_{\mathrm{roof},r}}{m_r\left(\omega_r^2 - \omega^2 + 2i\zeta_r \omega_r \omega\right)} \quad (5)$$

Trong công thức (5), N là số dạng được tích phân, còn r là số thứ tự dạng. Đại lượng $\omega = 2\pi f$ là tần số góc kích thích; ω_r và ζ_r lần lượt là tần số góc riêng và tỷ số cản của dạng r. Ký hiệu $i = \sqrt{-1}$ là đơn vị ảo. Các đại lượng ϕ_{jr} tại tầng j và $\phi_{\mathrm{roof},r}$ tại mái lần lượt là tung độ trung bình của dạng dao động tại vị trí đặt lực và vị trí quan sát; m_r là khối lượng tổng quát của dạng.

Trong công thức (5), mỗi thành phần của hàm truyền biểu diễn gia tốc mái do một lực điều hòa đơn vị đặt tại một tầng. Tung độ dạng dao động tại tầng đặt lực xác định mức kích thích của dạng, còn tung độ tại mái xác định đóng góp vào đáp ứng. Mẫu số biểu diễn độ cứng động của dạng, gồm quán tính, độ cứng và cản; thừa số tần số bình phương ở tử số chuyển hàm truyền chuyển vị thành hàm truyền gia tốc. Tổng đóng góp của các dạng tạo hàm truyền nhiều dạng dùng để xác định phổ gia tốc và gia tốc RMS:

$$S_a(f) = \mathbf{h}^H(f) S_F(f) \mathbf{h}(f), \qquad a_{\mathrm{RMS}} = \left[\int_0^\infty S_a(f) df\right]^{1/2} \quad (6)$$

Vectơ $\boldsymbol{h}(f)$ tập hợp các hàm truyền từ lực tại mọi tầng đến gia tốc mái, còn $\boldsymbol{S}_F(f)$ chứa mật độ phổ tự trên đường chéo và mật độ phổ chéo ngoài đường chéo. Ký hiệu H biểu thị phép chuyển vị liên hợp phức (Hermitian transpose).

Dạng toàn phương trong Công thức (6) tổng hợp cả biên độ và quan hệ pha của các lực tầng tương quan. Tích phân phổ gia tốc trên miền tần số dương cho phương sai gia tốc; căn bậc hai là gia tốc RMS. Phổ gia tốc được tích phân trên lưới tần số cơ sở có chia mịn quanh từng tần số riêng. Hội tụ theo 8, 30, 60 và 100 dạng được kiểm tra trước khi tổng hợp kết quả.

Các mômen phổ bậc không và bậc hai được xác định lần lượt bởi $m_0 = \int S_a(f)\,\mathrm{d}f$ và $m_2 = \int (2\pi f)^2 S_a(f)\,\mathrm{d}f$. Mômen bậc không bằng phương sai gia tốc, còn tỷ số giữa hai mômen xác định tần số đặc trưng của phổ. Với thời gian quan sát $T_{\mathrm{obs}} = 600$ s, tần suất cắt mức không theo chiều dương (zero-upcrossing rate) ν_0 và hệ số đỉnh Davenport được xác định theo Công thức (7) [21]:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \qquad g_p = \sqrt{2\ln(\nu_0 T_{\mathrm{obs}})} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(\nu_0 T_{\mathrm{obs}})}} \quad (7)$$

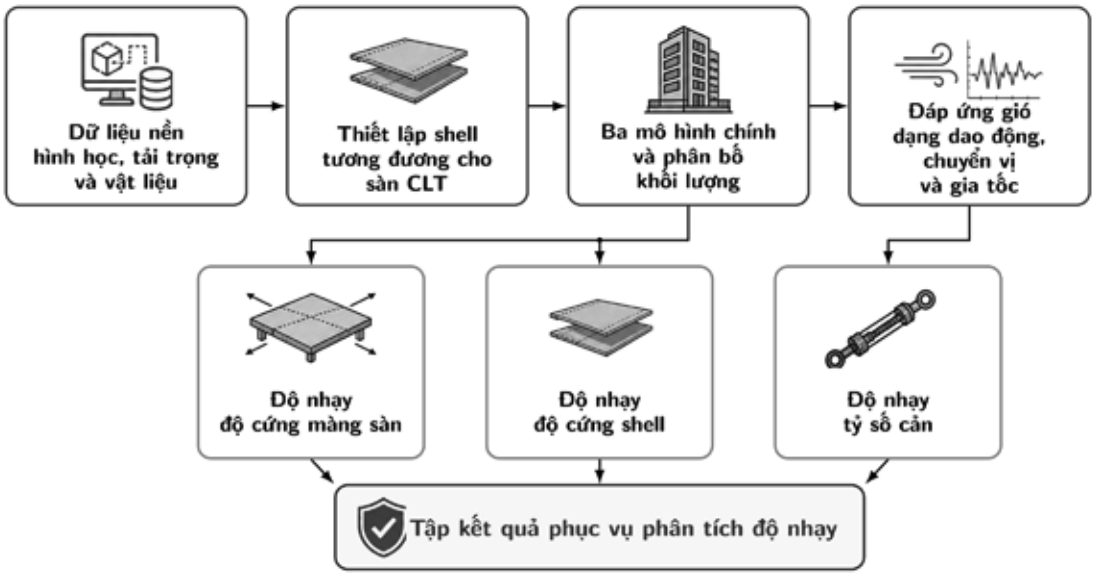
Gia tốc đỉnh thỏa $a_{\mathrm{peak}} = g_p a_{\mathrm{RMS}}$. Hệ số đỉnh phụ thuộc vào tần suất cắt mức không của đáp ứng và thời gian quan sát. Ba mức $\zeta = 1\%$, 2% và 5% được tích phân trực tiếp bằng cách tính lại hàm truyền và phổ gia tốc cho từng mức, thay vì nhân tỷ lệ từ một trường hợp cản chuẩn.

Gia tốc mái được dùng để so sánh độ nhạy giữa các giả thiết mô hình. Hệ số giật G_f của bài toán chuyển vị tĩnh được cập nhật theo tần số riêng của từng mô hình theo TCVN 2737:2023 [13].

Thời gian quan sát 600 s được dùng nhất quán để xác định hệ số đỉnh g_p trong Bảng 6 và tái lập gia tốc đỉnh; các so sánh sử dụng gia tốc RMS. Hệ số lực theo phương X và Y được giữ cố định ở $c_{f,X} = 1{,}4$ và $c_{f,Y} = 1{,}475$ theo TCVN 2737:2023 [13]. Bảng 3 tổng hợp hệ số giật và lực gió của ba mô hình chính.

Bảng 3. Hệ số giật và lực gió tổng dùng trong phân tích chuyển vị tĩnh của ba mô hình chính

Mô hình	$c_{f,X}$	$G_{f,X}$	ΣF_X (kN)	$c_{f,Y}$	$G_{f,Y}$	ΣF_Y (kN)
Không xét độ cứng sàn	1.400	0.896	635.6	1.475	0.947	1102.1
Sàn CLT (shell)	1.400	0.877	621.9	1.475	0.890	1035.6
Sàn cứng	1.400	0.877	621.7	1.475	0.889	1035.0



Hình 2. Quy trình mô hình hóa và ba nhánh đánh giá độ nhạy chính của đáp ứng gió

Vì G_f phụ thuộc vào tần số riêng, lực gió tĩnh tổng thay đổi nhẹ giữa các mô hình; chuyển vị mái phản ánh đồng thời sự thay đổi của độ cứng và tải gió.

3.3. Đánh giá độ nhạy

Các nhánh phân tích dùng chung hình học, vật liệu, khối lượng và thông số gió nền (Hình 2); chỉ G_f của bài toán chuyển vị tĩnh được cập nhật theo tần số riêng của từng mô hình. Sai khác tương đối được tính bằng $\Delta_R = (R_{\text{model}} - R_{\text{ref}})/R_{\text{ref}} \times 100\%$. Mô hình không xét độ cứng sàn là tham chiếu khi lượng hóa ảnh hưởng của việc bổ sung độ cứng sàn; mô hình sàn CLT đàn hồi là tham chiếu khi đánh giá gần đúng sàn cứng. Giá trị tham chiếu của các kiểm tra bổ sung được nêu riêng trong từng bảng. Dấu dương biểu thị đáp ứng lớn hơn tham chiếu và dấu âm biểu thị đáp ứng nhỏ hơn.

4. KIỂM TRA HỘI TỤ VÀ ĐỘ NHẠY MÔ HÌNH SỐ

Giảm kích thước phần tử từ 1,0 xuống 0,5 m làm gia tốc RMS thay đổi tối đa 0,0162%, còn chu kỳ và chuyển vị thay đổi không quá 0,008% (Bảng 4). Sai khác này xác nhận lưới 1,0 m đủ hội tụ đối với các đại lượng đáp ứng toàn cục. So sánh trực hướng với đẳng hướng tạo chênh lệch lớn nhất 0,33% ở chuyển vị X, còn chênh lệch giữa ShellThin và ShellThick không quá 0,0156%. Hai so sánh sau cho thấy đáp ứng toàn cục ít nhạy với tính trực hướng và biến dạng cắt ngang trong cấu hình khảo sát. Trong Bảng 4, lưới 1,0 m, mô hình đẳng hướng và ShellThin lần lượt là cấu hình tham chiếu; chênh lệch chuyển vị được tính từ chuyển vị mái trung bình và chênh lệch gia tốc được tính từ gia tốc RMS tại tỷ số cản 2%.

Bảng 4. Sai khác tương đối trong kiểm tra hội tụ lưới và các khảo sát độ nhạy mô hình

Nội dung kiểm tra	So sánh	ΔT_1 (%)	ΔT_2 (%)	ΔU_X (%)	ΔU_Y (%)	Δa_X (%)	Δa_Y (%)
Hội tụ lưới	1.0 m → 0.5 m	0.0034	0.0005	0.0027	0.0080	0.0143	0.0162
Tính trực hướng	Đẳng hướng → trực hướng	0.0436	0.1473	0.3301	0.0729	0.1962	0.2612
Biến dạng cắt ngang	ShellThin → ShellThick	−0.0039	−0.0102	−0.0156	−0.0070	−0.0054	−0.0013

Bảng 5 so sánh đáp ứng và độ trượt tại hai mức độ cứng của liên kết sàn-khung. Các sai khác được tính so với cấu hình liên kết gần cứng có cùng sơ đồ bố trí phần tử liên kết.

Bảng 5. Độ nhạy của đáp ứng tổng thể đối với độ cứng trượt của liên kết sàn-khung

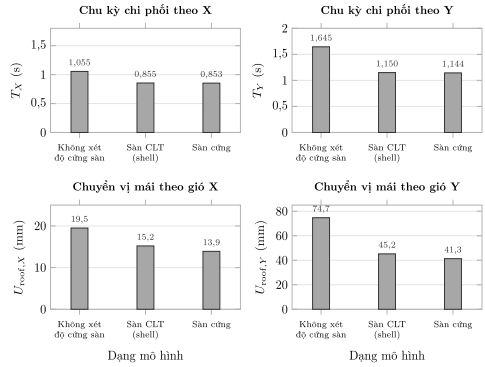
Mức độ cứng liên kết	k_{line} (MN/m²)	$\Delta T_1/\Delta T_2$ (%)	$\Delta U_X/\Delta U_Y$ (%)	Trượt lớn nhất X/Y (mm)
K_{ser}	12.19	0.078/0.101	0.630/0.483	0.091/0.218
$2K_{\text{ser}}$	24.39	0.053/0.073	0.362/0.267	0.050/0.119

Giảm độ cứng phần tử liên kết làm chuyển vị tăng không quá 0,63% và độ trượt lớn nhất đạt 0,218 mm. Với cấu hình vít giả định, chênh lệch chuyển vị do độ mềm liên kết nhỏ hơn ít nhất 13 lần so với chênh lệch 8,3–8,7% giữa mô hình sàn CLT đàn hồi và sàn cứng.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Đặc trưng động lực học và chuyển vị mái

So với mô hình không xét độ cứng sàn, mô hình sàn CLT đàn hồi làm chu kỳ giảm từ 1,645 xuống 1,15 s theo Y và từ 1,055 xuống 0,855 s theo X, tương ứng 30,1% và 18,9%. Chuyển vị mái giảm từ 74,7 xuống 45,2 mm theo Y và từ 19,5 xuống 15,2 mm theo X, tương ứng 39,4% và 22,0% (Hình 3). Mức giảm này phản ánh đóng góp của độ cứng màng sàn CLT vào độ cứng ngang hiệu dụng của hệ khung-giằng.



Hình 3. Chu kỳ chi phối và chuyển vị mái trung bình theo X/Y của ba mô hình

Giữa mô hình sàn CLT đàn hồi và sàn cứng, chu kỳ chỉ chênh 0,5% theo Y và 0,3% theo X, nhưng chuyển vị chênh 8,3–8,7%. Sự tương đồng về chu kỳ do đó không bảo đảm sự tương đồng về chuyển vị. Mô hình sàn cứng tái hiện gần đúng chu kỳ nhưng cho chuyển vị thấp hơn mô hình sàn CLT đàn hồi.

Phương Y chi phối chuyển vị do có chu kỳ dài hơn, diện đón gió lớn hơn và lực gió tổng lớn hơn. Mức thay đổi lực do cập nhật hệ số giật nhỏ hơn mức giảm chuyển vị; độ cứng ngang hiệu dụng vì thế quyết định phần lớn chênh lệch giữa các mô hình.

5.2. Gia tốc RMS và tỷ số cản

Bảng 6 đối chiếu gia tốc RMS của ba mô hình tại ba mức tỷ số cản.

Bảng 6. Gia tốc RMS nhiều dạng dao động tại mái; đơn vị $\mathrm{mg} = 10^{-3}g$, với g là gia tốc trọng trường

Mô hình	Gió	*N* tích phân (*N* khảo sát)	ΣU_r	RMS 1%	RMS 2%	RMS 5%	g_P 2%
Không xét độ cứng sàn	X	22 (100)	0.9946	22.61	16.02	10.27	4.20
Không xét độ cứng sàn	Y	24 (100)	0.9978	48.03	34.04	21.80	4.10
Sàn CLT (shell)	X	18 (100)	0.9997	26.41	18.75	12.03	4.31
Sàn CLT (shell)	Y	26 (100)	0.9999	50.66	35.93	22.94	4.23
Sàn cứng	X	15 (45)	1.0000	26.18	18.55	11.87	4.31
Sàn cứng	Y	15 (45)	1.0000	50.12	35.49	22.60	4.23

Sau khi áp dụng ngưỡng tỷ lệ khối lượng tham gia 10^{-5}, tích phân theo X/Y sử dụng 22/24 dạng cho mô hình không xét độ cứng sàn. Mô hình sàn CLT đàn hồi sử dụng 18/26 dạng; cả hai mô hình được khảo sát trong bộ 100 dạng. Mô hình sàn cứng sử dụng 15/15 dạng trong tổng số 45 dạng động trong mặt phẳng. Ở bước hội tụ từ 60 lên 100 dạng, gia tốc RMS thay đổi tối đa 2,03% ở mô hình không xét độ cứng sàn và 0,23% ở mô hình sàn CLT, đều theo X.

Tỷ số cản 1,9% được báo cáo cho công trình Treet [8] là cơ sở chọn 2% làm mức trung tâm; các mức 1% và 5% đại diện cho cận dưới và cận trên của khảo sát. Khi ζ tăng từ 1% lên 5%, gia tốc RMS giảm 54-55%. Tại $\zeta = 2\%$, gia tốc theo Y lớn hơn X từ 1,91 đến 2,12 lần do phương Y có tần số thấp hơn và lực gió tổng lớn hơn.

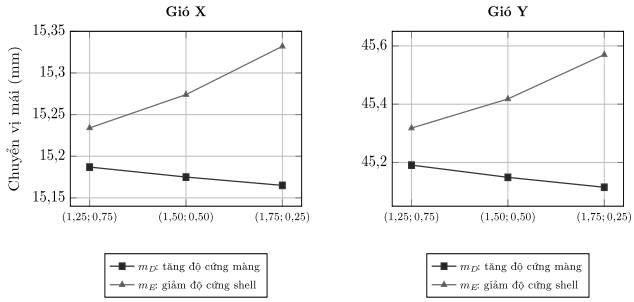
Tại $\zeta = 2\%$, mô hình sàn CLT đàn hồi cho gia tốc RMS lớn hơn mô hình không xét độ cứng sàn 17,0% theo X và 5,6% theo Y, mặc dù chuyển vị mái giảm. Gia tốc tăng vì phụ thuộc đồng thời vào dạng dao động, khối lượng tổng quát và quan hệ giữa tần số riêng, hàm truyền và phân bố năng lượng của phổ kích động. Ngược lại, gia tốc giữa mô hình sàn CLT đàn hồi và sàn cứng chênh dưới 1,3%. Mức biến thiên theo tỷ số cản lớn hơn nhiều sai khác giữa hai mô hình sàn; tỷ số cản vì thế chi phối gia tốc RMS trong bộ mô hình khảo sát.

5.3. Độ nhạy theo giả thiết sàn và độ cứng shell

Khi hệ số độ cứng màng tăng từ 1,25 lên 1,75, chuyển vị mái trung bình giảm 0,15% theo X và 0,17% theo Y. Khi hệ số nhân đồng nhất độ cứng shell giảm từ 0,75 xuống 0,25, chuyển vị tăng 0,65% và 0,56% (Hình 4).

Trong miền hệ số khảo sát, đáp ứng toàn cục ít nhạy với biến thiên độ cứng shell hơn so với trường hợp loại bỏ hoàn toàn độ cứng sàn. Trượt liên kết và biến thiên độ cứng shell gây ảnh hưởng cùng bậc, nhưng đều nhỏ hơn chênh lệch giữa mô hình sàn CLT đàn hồi và sàn cứng.

Hai nhánh được khảo sát độc lập: m_D chỉ thay đổi độ cứng màng; m_E thay đổi đồng thời độ cứng màng, uốn và cắt. Các cặp trên trục hoành lần lượt ghi giá trị của hai nhánh.



Hình 4. Độ nhạy chuyển vị mái trung bình theo X/Y đối với $m_D = 1{,}25/1{,}50/1{,}75$ và $m_E = 0{,}75/0{,}50/0{,}25$; trục tung được thu hẹp để thể hiện biến thiên dưới 1%; hai chuỗi tham số được phân tích độc lập

Việc chọn mô hình sàn CLT đàn hồi hay sàn cứng ảnh hưởng đến chuyển vị mạnh hơn các biến thiên tham số độ cứng shell và liên kết sàn-khung. Xu hướng chuyển vị tĩnh không dự báo được xu hướng gia tốc mái; đánh giá gia tốc vẫn cần phân tích động.

6. KẾT LUẬN

Ở mô hình nhà 15 tầng có cùng khối lượng, sàn CLT đàn hồi làm chu kỳ giảm 30,1% theo Y và 18,9% theo X so với mô hình không xét độ cứng sàn. Chuyển vị mái tương ứng giảm 39,4% và 22,0%. Mô hình sàn cứng cho chu kỳ gần với mô hình sàn CLT đàn hồi nhưng dự báo chuyển vị thấp hơn 8,3-8,7%. Sự tương đồng về chu kỳ vì thế chưa đủ để đánh giá ảnh hưởng của giả thiết sàn đến chuyển vị.

Giảm kích thước phần tử từ 1,0 xuống 0,5 m làm đáp ứng thay đổi không quá 0,0162%. Các khảo sát trực hướng và biến dạng cắt cho sai khác không quá 0,33%, còn độ mềm liên kết làm chuyển vị thay đổi không quá 0,63%.

Tại $\zeta = 2\%$, mô hình sàn CLT đàn hồi cho gia tốc RMS bằng 18,75 mg theo X và 35,93 mg theo Y. Khi ζ tăng từ 1% lên 5%, gia tốc giảm 54-55%, lớn hơn nhiều sai khác dưới 1,3% giữa mô hình sàn CLT đàn hồi và sàn cứng.

Hai kết quả này tách biệt các cơ chế chi phối: cách lý tưởng hóa sàn ảnh hưởng mạnh hơn đến chuyển vị, còn tỷ số cản ảnh hưởng mạnh hơn đến gia tốc RMS.

Đối với hệ kết cấu khảo sát, mô hình sàn cứng tái hiện gần đúng chu kỳ và gia tốc RMS nhưng dự báo chuyển vị thấp hơn mô hình sàn CLT đàn hồi. Vì thế, cách biểu diễn sàn phải được lựa chọn theo đại lượng thiết kế cần kiểm soát. Khảo sát lưới xác nhận độ hội tụ số của các đại lượng đáp ứng toàn cục, còn các nhánh trực hướng, dạng phần tử và liên kết định lượng độ nhạy đối với giả thiết mô hình. Nghiên cứu tiếp theo cần hiệu chỉnh độ cứng màng, độ mềm mối nối và tỷ số cản bằng thí nghiệm thành phần hoặc dữ liệu quan trắc công trình.

Các kết luận áp dụng cho nhà có hình học đều, sàn CLT liên tục dày 175 mm, cấu hình vít giả định và tải gió theo phương dọc gió. Kết quả gia tốc còn phụ thuộc vào phổ Kaimal/IEC và hệ số suy giảm tương quan theo phương đứng được giữ cố định bằng 10. Khi mở rộng sang công trình cụ thể, mô hình cần xét thêm độ mềm mối nối giữa các tấm, đáp ứng ngang gió và xoắn. Đánh giá tiện nghi theo ISO 10137 cần vận tốc gió chu kỳ lặp một năm tại địa điểm, tỷ số cản thiết kế và đường giới hạn phù hợp với công năng [5].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel. Cross laminated timber (CLT): Overview and development. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 74, no. 3, pp. 331-351, 2016.

[2] Arup. Rethinking timber buildings: Seven perspectives on the use of timber in building design and construction. Arup Research Report, 2019.

[3] APA - The Engineered Wood Association. ANSI/APA PRG 320-2018: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. APA - The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, 2018.

[4] FPInnovations. Canadian CLT Handbook: 2019 Edition. FPInnovations, Pointe-Claire, QC, 2019.

[5] International Organization for Standardization. ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.

[6] B. S. Smith, A. Coull. Tall building structures: Analysis and design. John Wiley & Sons, 1991.

[7] A. K. Chopra. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, 5th ed. Pearson, 2017.

[8] K. A. Malo, R. Abrahamsen, M. A. Bjertnaes. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building Treet in Norway. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 74, no. 3, pp. 407-424, 2016.

[9] E. Karacabeyli, B. Douglas, eds. CLT Handbook: Cross-Laminated Timber, U.S. Edition, Special Publication SP-529. FPInnovations, Pointe-Claire, QC, 2013.

[10] X. Zhao, B. Zhang, T. Kilpatrick, I. Sanderson. Numerical analysis on global serviceability behaviours of tall CLT buildings to the eurocodes and UK national annexes. Buildings, vol. 11, no. 3, Art. no. 124, 2021.

[11] P. T. Hoàn, H. T. Đạt, N. T. Thắng. Khảo sát ảnh hưởng của mô hình hóa sàn lõi rỗng sử dụng phần mềm ETABS tới phản ứng động học của nhà nhiều tầng. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, vol. 14, no. 2V, pp. 34–51, 2020.

[12] N. T. Huyền and T. Đồng. Sử dụng mô hình phần tử hữu hạn kiểm tra liên kết gỗ bị cắt ghép với chốt thép dưới tác dụng tải trọng tĩnh đơn. Tạp chí Xây dựng, đăng ngày 29/08/2025.

[12] N. T. Huyền, T. Đồng. Sử dụng mô hình phần tử hữu hạn kiểm tra liên kết gỗ bị cắt ghép với chốt thép dưới tác dụng tải trọng tĩnh đơn. Tạp chí Xây dựng, đăng ngày 29/08/2025. Internet. https://tapchixaydung.vn/su-dung-mo-hinh-phan-tu-huu-han-kiem-tra-lien-ket-go-bi-cat-ghep-voi-chot-thep-duoi-tac-dung-tai-trong-tinh-don-20201224000032859.html (truy cập: tháng 7/2026)

[13] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 2737:2023: Tải trọng và tác động – Tiêu chuẩn thiết kế. Hà Nội, 2023.

[14] Bộ Xây dựng. QCVN 02:2022/BXD: Số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng. Hà Nội, 2022.

[15] Computers and Structures, Inc. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE, CSiBridge, and CSiPlant, Rev. 21. Walnut Creek, CA, June 2025.

[16] M. Wallner-Novak, M. Augustin, J. Koppelhuber, and K. Pock. Cross-laminated timber structural design, volume 2: applications. 2018. Vienna, Austria, proHolz Austria.

[16] M. Wallner-Novak, M. Augustin, J. Koppelhuber, K. Pock. Cross-laminated timber structural design, volume 2: applications. proHolz Austria, Vienna, Austria, 2018.

[17] A. G. Davenport. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 19, pp. 449-472, 1961.

[18] B. J. Jonkman. TurbSim User's Guide: Version 1.50. Technical Report NREL/TP-500-46198. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2009.

[19] E. Şafak, E. Uzgider, A. Şanli. Response Spectrum Techniques for Predicting Wind-Induced Vibrations and Discomfort in High-Rise Buildings. Part 1: Along-Wind Direction Vibrations. U.S. Geological Survey Open-File Report 90-19. Menlo Park, CA, 1990.

[20] I. F. Huergo, H. Hernandez-Barrios, R. Gomez-Martinez. Analytical simulation of 3D wind-induced vibrations of rectangular tall buildings in time domain. Shock and Vibration, Article ID 7283610, 26 pages, 2022.

[21] A. G. Davenport. Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 28, no. 2, pp. 187-196, 1964.

■Ngày nhận bài: 21/9/2026 ■Ngày sửa bài: 06/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 13/10/2026

Xác định hệ số chiều dài tính toán của cột trong khung thép một tầng có dầm xiên và chuyển vị ngang

Determination of column effective length factors in sidesway single-story steel frames with inclined rafters

> TS LÊ TRUNG KIÊN*, TS NGÔ VIỆT DŨNG
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM
*Email: kienlt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp xác định hệ số chiều dài tính toán của cột trong khung thép một tầng, một nhịp đối xứng có dầm xiên và có chuyển vị ngang tại đỉnh cột. Hai trường hợp chân cột khớp và ngàm được xét riêng. Trên cơ sở phương trình ổn định đàn hồi của cột, các hàm ổn định và độ cứng chống xoay tương đương của dầm xiên, các phương trình đặc trưng được thiết lập theo một tham số không thứ nguyên tổng hợp phản ánh đồng thời tỷ số độ cứng dầm-cột, tỷ số nhịp-chiều cao và góc dốc mái. Các nghiệm lý thuyết được kiểm chứng bằng trường hợp dầm ngang của Chen và 36 kết quả phân tích trị riêng bằng ANSYS cho dầm ngang và dầm xiên; sai số lớn nhất lần lượt nhỏ hơn 0,084% đối với chân khớp và 0,144% đối với chân ngàm. Khảo sát mở rộng đến B/H = 10 cho thấy ảnh hưởng của góc xiên đặc biệt rõ đối với khung chân khớp. Hai công thức gần đúng không cần giải phương trình siêu việt được đề xuất; phép kiểm tra độc lập tại B/H = 3, $\gamma = 20°$ và $0,25 \leq I_r/I_c \leq 4$ cho sai số lớn nhất 0,013% và 0,018%. Kết quả được đối sánh với TCVN 5575:2024 để làm rõ ảnh hưởng của góc xiên mà công thức trong tiêu chuẩn hiện hành chưa phản ánh trực tiếp.

Từ khóa: Khung thép; dầm xiên; chiều dài tính toán; mất ổn định đàn hồi; khung có chuyển vị ngang.

ABSTRACT

This paper presents a procedure for determining the effective length factor of columns in symmetric single-story, single-bay steel frames with inclined rafters and sidesway at the column tops. Pinned and fixed column bases are considered separately. Starting from the elastic stability equation of a beam-column, column stability functions and the equivalent rotational stiffness of the inclined rafters are combined to obtain characteristic equations governed by a single dimensionless parameter incorporating the beam-to-column stiffness ratio, span-to-height ratio and roof slope. The analytical solutions are verified against Chen's horizontal-beam benchmark and 36 ANSYS eigenvalue results for horizontal and inclined rafters. The maximum discrepancies are below 0.084% for pinned bases and 0.144% for fixed bases. An extended parametric study up to B/H = 10 demonstrates that the roof slope has a pronounced influence, particularly for pinned-base frames. Two explicit approximation formulas are proposed, avoiding the iterative solution of transcendental equations. Independent checks at B/H = 3, $\gamma = 20°$ and $0.25 \leq I_r/I_c \leq 4$ give maximum errors of 0.013% and 0.018%, respectively. Comparison with TCVN 5575:2024 highlights the effect of rafter inclination that is not explicitly represented by the current horizontal-beam expressions.

Keywords: Steel frame; inclined rafter; effective length factor; elastic buckling; sway frame.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ số chiều dài tính toán μ cho phép quy đổi cột trong hệ khung về cột khớp hai đầu có cùng tải trọng tới hạn Euler. TCVN 5575:2024 quy định chiều dài tính toán $L_{ef} = \mu L$ và cho các biểu thức xác định μ của cột tiết diện không đổi trong khung tự do và khung không tự do thông qua độ cứng tương đối của xà và cột [1]. Khái niệm chiều dài tính toán và các biểu đồ tương tác độ cứng đã được sử dụng rộng rãi cho khung không giằng; các nghiên cứu của Yura [2], Duan và Chen [3], Kishi và cộng sự [4] đã làm rõ vai trò của điều kiện biên, độ cứng nút và cấu kiện liên kết đối với hệ số μ.

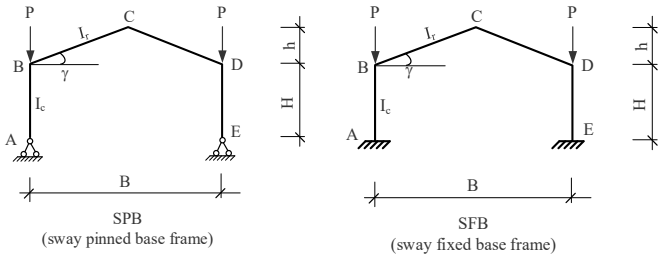
Đối với khung mái dốc, chiều dài dầm thực, quan hệ động học tại đỉnh mái và độ cứng truyền về đầu cột thay đổi theo góc xiên. Saffari và cộng sự [5] xây dựng phương pháp xác định hệ số chiều dài tính toán cho khung mái dốc có cấu kiện vát; Ibrahim [6] phát

triển các biểu thức độ cứng của dầm vát và chiều dài mất ổn định cho khung có và không có chuyển vị ngang; Haghollahi và Safavi [7] thiết lập phương trình đặc trưng cho mất ổn định uốn trong mặt phẳng của khung mái dốc không chuyển vị ngang. Gần đây, Slimani và cộng sự [8] tiếp tục nhấn mạnh vai trò ràng buộc ở đầu cột đến sự làm việc ổn định của nó.

Trong thực hành, công thức tiêu chuẩn cho dầm ngang rất thuận tiện nhưng chưa thể hiện trực tiếp ảnh hưởng của góc mái. Mục tiêu của nghiên cứu này là: (i) thiết lập từng bước phương trình đặc trưng cho khung mái dốc có chuyển vị ngang, ứng với chân cột khớp (SPB) và chân cột ngàm (SFB); (ii) kiểm chứng bằng nghiệm chuẩn và phân tích trị riêng ANSYS; (iii) khảo sát ảnh hưởng của B/H và γ; (iv) đề xuất công thức gần đúng có độ chính xác cao, thuận tiện cho tính toán; và (v) đối sánh với TCVN 5575:2024 trong trường hợp dầm ngang và khi góc mái khác không.

2. MÔ HÌNH TÍNH VÀ CÁC GIẢ THIẾT

Xét khung thép phẳng một tầng, một nhịp đối xứng A-B-C-D-E. Hai cột AB và DE có chiều cao H; hai dầm xiên BC và CD gặp nhau tại đỉnh C; B là khoảng cách ngang giữa hai trục cột; γ là góc xiên của dầm so với phương ngang, chiều dài dầm xiên là L_r. Hai lực nén thẳng đứng P đặt tại hai đỉnh cột B và D. Cột và dầm có tiết diện không đổi, mô-men quán tính lần lượt là I_c và I_r; liên kết dầm-cột là nút cứng. Hai trường hợp chân cột được xét: khớp (SPB) và ngàm (SFB). Khung không có liên kết chống chuyển vị ngang tại đỉnh cột.



Hình 1. Sơ đồ khung một tầng có dầm xiên (chân khớp - SPB và chân ngàm - SFB)

$$L_r = \frac{B}{2\cos\gamma} \tag{1}$$

Với sơ đồ tải đang xét, cân bằng tại đỉnh C trong trạng thái trước mất ổn định cho lực dọc trong dầm $N_r = 0$; mỗi cột chịu $N_c = P$. Vì vậy độ cứng hình học chỉ xuất hiện trong cột. Vật liệu được giả thiết đàn hồi tuyến tính; biến dạng trượt, khuyết tật hình học và phi tuyến vật liệu không xét trong bài báo. Để thu được biểu thức thiết kế gọn, biến dạng dọc của dầm được bỏ qua; mức độ phù hợp của giả thiết này được kiểm tra bằng ANSYS ở mục 4.

$$N_c = P, \quad N_r = 0 \tag{2}$$

Các tham số không thứ nguyên được dùng gồm tỷ số độ cứng EI_r/EI_c, tỷ số hình học r = B/H và ρ = H/L_r. Từ (1) ta có:

$$\eta = \frac{I_r}{I_c}, \quad r = \frac{B}{H}, \quad \rho = \frac{H}{L_r} = \frac{2H\cos\gamma}{B} \tag{3}$$

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG TRÌNH ĐẶC TRƯNG

3.1. Phương trình ổn định và các hàm ổn định của cột

Xét một cột thẳng Euler-Bernoulli, tiết diện không đổi, chịu lực nén P. Ở trạng thái lân cận vị trí cân bằng thẳng, phương trình vi phân ổn định đàn hồi trong mặt phẳng là:

$$EI_c\, w'''' + P\, w'' = 0 \tag{4}$$

Đặt $k^2 = P/(EI_c)$ và λ = kH. Tham số λ liên hệ trực tiếp với hệ số chiều dài tính toán μ thông qua tải Euler:

$$\lambda = H\sqrt{\frac{P}{EI_c}}, \quad \mu = \frac{\pi}{\lambda} \tag{5}$$

Nghiệm tổng quát của (4) là $w(x) = C_1 + C_2x + C_3\sin(kx) + C_4\cos(kx)$. Áp các điều kiện biên ở hai đầu cột và biểu diễn lực nút theo chuyển vị ngang Δ và góc xoay θ tại đỉnh cột thu được các hàm ổn định. Với chân ngàm, đặt:

$$Q = \lambda\sin\lambda + 2\cos\lambda - 2 \tag{6}$$

$$A_f = \frac{-\lambda^3\sin\lambda}{Q}, \quad B_f = \frac{\lambda^2(\cos\lambda - 1)}{Q}, \quad D_f = \frac{\lambda(\lambda\cos\lambda - \sin\lambda)}{Q} \tag{7}$$

Với chân khớp, sau khi áp dụng điều kiện mô-men tại chân cột bằng không, các hệ số tại đỉnh cột có thể viết:

$$D = \lambda\cos\lambda - \sin\lambda \tag{8}$$

$$A_h = \frac{-\lambda^3\cos\lambda}{D_h}, \quad B_h = \frac{-\lambda^2\sin\lambda}{D_h}, \quad C_h = \frac{-\lambda^2\sin\lambda}{D_h} \tag{9}$$

3.2. Độ cứng chống xoay tương đương của dầm xiên

Do khung và tải đối xứng nhưng dạng (mode) mất ổn định có chuyển vị ngang, hai đỉnh cột B và D chuyển vị ngang cùng chiều. Trong giới hạn biến dạng dọc dầm không đáng kể, đỉnh mái C có cùng chuyển vị ngang với B và D. Với mỗi nửa dầm mái không chịu lực dọc, quan hệ mô men-góc xoay của phần tử đàn hồi có thể viết theo phương pháp chuyển vị. Cân bằng mô men tại C của hai nửa dầm cho $\theta_C = -\theta_B/2$. Thay quan hệ này vào mô men đầu B thu được độ cứng chống xoay tương đương của dầm mái truyền về một đầu cột:

$$k_{\theta,r} = \frac{3EI_r}{L_r} \tag{10}$$

Chuẩn hóa (10) theo EI_c/H, độ cứng dầm tham gia vào phương trình đặc trưng bằng:

$$\frac{k_{\theta,r}H}{EI_c} = 3\eta\rho = 6\frac{I_r}{I_c}\frac{H}{B}\cos\gamma \tag{11}$$

Phương trình (11) cho thấy ảnh hưởng của độ cứng dầm, tỷ số nhịp-chiều cao và góc xiên có thể được gom vào một tham số duy nhất. Đặt:

$$\xi = \frac{I_r}{I_c}\frac{H}{B}\cos\gamma, \quad t = \frac{1}{\xi} = \frac{B}{H}\frac{I_c}{I_r}\frac{1}{\cos\gamma} \tag{12}$$

3.3. SPB -Khung chân cột khớp, có chuyển vị ngang đỉnh cột

Chọn hai ẩn độc lập tại đỉnh cột là chuyển vị ngang Δ và góc xoay θ. Sau khi cô đọng độ cứng của dầm mái, phương trình cân bằng đồng nhất của nửa khung có dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} A_h & B_h \\ B_h & C_h + 3\eta\rho \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta/H \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Điều kiện tồn tại nghiệm khác không là định thức của ma trận trong (13) bằng không:

$$A_h(C_h + 3\eta\rho) - B_h^2 = 0 \tag{14}$$

Thay các hàm (8)-(9) vào (14), rút gọn và sử dụng (11), phương trình đặc trưng SPB thu được ở dạng đặc biệt đơn giản:

$$\lambda\tan\lambda = 3\eta\rho = 6\xi = \frac{6}{t} \tag{15}$$

Nghiệm nhỏ nhất của (15) nằm trong $0 < \lambda < \pi/2$. Sau khi tìm λ, hệ số chiều dài tính toán được xác định từ $\mu_p = \pi/\lambda$ theo (5).

3.4. SFB - Khung chân cột ngàm, có chuyển vị ngang

Với chân ngàm, các hàm ổn định (7) được sử dụng trực tiếp. Sau khi cô đọng độ cứng dầm mái như trên, hệ phương trình cân bằng tại đỉnh cột có dạng:

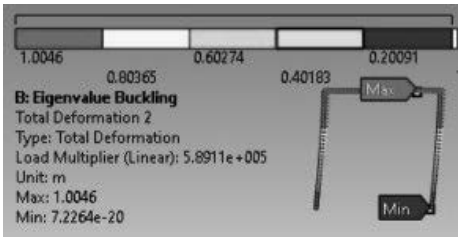
$$\begin{bmatrix} A_f & B_f \\ B_f & D_f + 3\eta\rho \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \Delta/H \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{16}$$

Từ điều kiện định thức bằng không, phương trình đặc trưng SFB là:

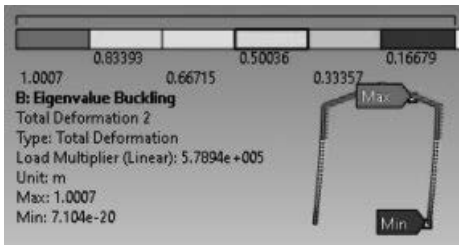
$$A_f(D_f + 3\eta\rho) - B_f^2 = 0 \tag{17}$$

Hay theo tham số ξ hoặc t:

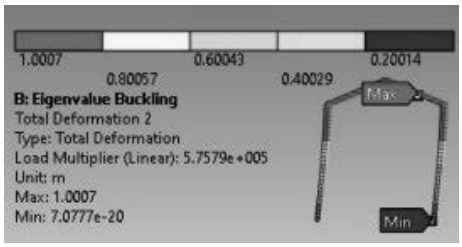
$$A_f(D_f + 6\xi) - B_f^2 = 0, \quad \xi = \frac{1}{t} \tag{18}$$



a) Dầm ngang



b) Dầm xiên 20⁰



c) Dầm xiên 40⁰

Hình 2. Dạng mất ổn định của khung với B/H =1

Các phương trình (15) và (18) là cơ sở lý thuyết chính của nghiên cứu. Điểm đáng chú ý là ba biến η, B/H và γ không xuất hiện độc lập mà chỉ thông qua ξ (hoặc t). Vì vậy các tổ hợp hình học và độ cứng khác nhau nhưng có cùng t sẽ cho cùng hệ số μ trong phạm vi các giả thiết của mô hình.

4. KIỂM CHỨNG KẾT QUẢ LÝ THUYẾT

4.1. Kiểm chứng trường hợp dầm ngang

Trước hết xét khung dầm ngang γ = 0°, B/H = 1 và I_r/I_c = 1. Đây là trường hợp chuẩn có thể đối chiếu với nghiệm của Chen [9]. Với khung SPB, (15) trở thành λ.tan λ = 6; với SFB, (17) cho nghiệm tương ứng của khung chân ngàm. Kết quả được so sánh với ANSYS trong Bảng 1.

Bảng 1. Kiểm chứng với khung dầm ngang, B/H = 1 và I_r/I_c = 1

Bài toán	Chen [9]	μ_LT	μ_ANSYS	Δ (%)
SPB - chân khớp	2.3278	2.3278	2.3298	−0,084
SFB - chân ngàm	1.1565	1.1565	1.1581	−0,138

Lý thuyết trùng với nghiệm chuẩn của Chen đến các chữ số thể hiện. Sai khác (D) so với ANSYS chỉ 0,084% đối với khung SPB và 0,138% đối với khung SFB. Kết quả này kiểm chứng đồng thời các hàm ổn định của cột, điều kiện chân cột và quá trình cô đọng độ cứng dầm.

4.2. Kiểm chứng với dầm xiên bằng ANSYS

Mô hình ANSYS sử dụng phần tử khung phẳng, vật liệu đàn hồi E = 20000 kN/cm², H = 600 cm; dầm và cột có tiết diện chữ nhật 12 × 18 cm nên I_r/I_c = 1. Ba tỷ số B/H = 1, 2 và 4 được khảo sát với γ = 0°, 5°, 10°, 20°, 30° và 40°. Phân tích trị riêng được dùng để xác định tải tới hạn và quy đổi về μ. Một số kết quả từ ANSYS được thể hiện ở Hình 2. Tất cả các trường hợp xảy ra ở dạng mất ổn định thứ nhất đều ở dạng phản xứng (chuyển vị hai đầu cột cùng chiều). Bảng 2 và 3 trình bày so sánh kết quả có được từ lý thuyết và từ ANSYS cho 30 trường hợp (trừ góc γ = 5° không ảnh hưởng nhiều đến xu hướng).

Bảng 2. Bảng so sánh kết quả từ lý thuyết và từ ANSYS cho khung SPB

B/H	γ	μ_LT	μ_ANSYS	Δ (%)
1	0°	2.3278	2.3298	-0,084%
1	10°	2.3327	2.3347	-0,083%
1	20°	2.3482	2.3502	-0,082%
1	30°	2.3769	2.3787	-0,079%
1	40°	2.4241	2.4259	-0,076%
2	0°	2.6345	2.6355	-0,036%
2	10°	2.6436	2.6446	-0,037%
2	20°	2.6721	2.6731	-0,036%
2	30°	2.7245	2.7254	-0,033%
2	40°	2.8099	2.8109	-0,033%
4	0°	3.1789	3.1796	-0,020%
4	10°	3.1945	3.1950	-0,016%
4	20°	3.2431	3.2437	-0,017%
4	30°	3.3317	3.3323	-0,016%
4	40°	3.4747	3.4752	-0,014%

Bảng 3. Bảng so sánh kết quả từ lý thuyết và từ ANSYS cho khung SFB

B/H	γ	μ_LT	μ_ANSYS	Δ (%)
1	0°	1.1565	1.1581	-0,138%
1	10°	1.1586	1.1603	-0,141%
1	20°	1.1654	1.1671	-0,142%
1	30°	1.1778	1.1794	-0,136%
1	40°	1.1977	1.1992	-0,125%
2	0°	1.2793	1.2804	-0,083%
2	10°	1.2826	1.2837	-0,085%
2	20°	1.2927	1.2938	-0,081%
2	30°	1.3108	1.3119	-0,077%
2	40°	1.3391	1.3402	-0,076%
4	0°	1.4446	1.4455	-0,058%
4	10°	1.4485	1.4494	-0,057%
4	20°	1.4605	1.4614	-0,055%
4	30°	1.4815	1.4824	-0,056%

Sai số tuyệt đối trung bình là 0,044% đối với SPB và 0,092% đối với SFB; sai số lớn nhất tương ứng 0,084% và 0,143%. Tất cả sai số đều nhỏ hơn 0,15%. Điều này chứng tỏ mô hình rút gọn phản ánh được cơ chế mất ổn định đàn hồi của khung trong miền khảo sát và giả thiết bỏ qua biến dạng dọc dầm là phù hợp đối với các trường hợp kiểm chứng. Dấu âm của sai số (D) thể hiện kết quả từ lý thuyết nhỏ hơn kết quả từ ANSYS.

5. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA GÓC XIÊN VÀ TỶ SỐ B/H

Để làm rõ ảnh hưởng hình học ngoài miền ANSYS đã kiểm chứng, nghiệm lý thuyết được mở rộng đến B/H = 6, 8 và 10, giữ I_r/I_c = 1. Bảng 4 trình bày kết quả tại các góc đặc trưng.

Bảng 4. Ảnh hưởng của γ đến μ - khung SPB, I_r/I_c = 1

B/H	0°	10°	20°	30°	40°	Tăng 0→40°
1	2,3279	2,3328	2,3483	2,3769	2,4241	4,13%

2	2,6346	2,6436	2,6721	2,7245	2,8100	6,66%
4	3,1790	3,1945	3,2431	3,3318	3,4747	9,30%
6	3,6516	3,6721	3,7362	3,8525	4,0391	10,61%
8	4,0728	4,0974	4,1744	4,3137	4,5364	11,38%
10	4,4557	4,4840	4,5720	4,7313	4,9853	11,89%

Bảng 5. Ảnh hưởng của γ đến μ - khung SFB, $I_r/I_c = 1$

B/H	0°	10°	20°	30°	40°	Tăng 0→40°
1	1,1565	1,1587	1,1654	1,1778	1,1977	3,56%
2	1,2793	1,2826	1,2928	1,3109	1,3392	4,68%
4	1,4447	1,4486	1,4606	1,4816	1,5131	4,74%
6	1,5485	1,5524	1,5642	1,5846	1,6145	4,26%
8	1,6196	1,6233	1,6344	1,6533	1,6809	3,78%
10	1,6713	1,6747	1,6850	1,7025	1,7277	3,38%

Đối với khung SPB, ảnh hưởng của góc xiên tăng rõ khi B/H tăng: tại B/H = 1, μ tăng khoảng 4,13% khi γ tăng từ 0° lên 40°, trong khi tại B/H = 10 mức tăng đạt khoảng 11,89%. Xu hướng này được có thể giải thích trực tiếp từ $\xi = (I_r/I_c).(H/B).\cos\gamma$: khi γ tăng, ξ giảm, tức độ cản xoay tương đối của mái đối với đầu cột giảm và μ tăng. Đối với khung SFB, chân ngàm góp phần tăng độ cản xoay nên độ nhạy với góc mái nhỏ hơn; mức tăng trong miền khảo sát khoảng 3,4-4,8%.

6. CÔNG THỨC GẦN ĐÚNG ĐỀ XUẤT

6.1. Dạng công thức

Mặc dù (15) và (18) có dạng gọn, việc xác định μ vẫn cần giải phương trình siêu việt. Để thuận tiện cho thiết kế, các nghiệm lý thuyết được xấp xỉ theo tham số t trong (12). Dạng hàm được chọn sao cho đơn giản, đơn trị và giữ đúng xu hướng giới hạn vật lý. Công thức đề xuất cho khung SPB là:

$$\mu = 2\sqrt{1 + 0{,}41194t - \frac{0{,}08170t}{1 + 0{,}42384t}} \tag{19}$$

Đối với SFB, công thức được chọn ở dạng hữu tỷ và ép điều kiện $\mu \to 2$ khi $t \to \infty$, tương ứng dầm mái rất mềm so với cột:

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + 1{,}11580t + 0{,}42392t^2}{1 + 0{,}79309t + 0{,}10598t^2}} \tag{20}$$

Trong cả hai công thức, t được xác định trực tiếp từ hình học và độ cứng theo (12), và không cần giải lặp tìm λ.

6.2. Kiểm chứng độc lập theo tỷ số I_r/I_c

Để tăng độ tin cậy của công thức, một tập kiểm tra độc lập được chọn tại B/H = 3 và γ = 20°, với I_r/I_c thay đổi từ 0,25 đến 4. Khoảng thay đổi độ cứng tương đối là 16 lần và tương ứng $0{,}798 \le t \le 12{,}770$.

Bảng 6. Kiểm chứng công thức gần đúng cho khung SPB tại B/H = 3, γ = 20°

I_r/I_c	t	μ_LT	μ_gần đúng (19)	Δ (%)
0,25	12,7701	4.9384	4.9387	+0,0063%
0,50	6,3851	3.7362	3.7360	-0,0041%
1,00	3,1925	2.9692	2.9693	+0,0044%
2,00	1,5963	2.5136	2.5137	+0,0039%
4,00	0,7981	2.2630	2.2627	-0,0127%

Bảng 7. Kiểm chứng công thức gần đúng SFB tại B/H = 3, γ = 20°

I_r/I_c	t	μ_LT	μ_gần đúng (20)	Δ (%)
0,25	12,7701	1.7232	1.7233	+0,0056%
0,50	6,3851	1.5642	1.5641	-0,0029%
1,00	3,1925	1.3878	1.3878	-0,0010%
2,00	1,5963	1.2338	1.2339	+0,0072%
4,00	0,7981	1.1273	1.1271	-0,0171%

Sai số lớn nhất của công thức gần đúng so với nghiệm lý thuyết chỉ 0,0127% đối với khung SPB và 0,0172% đối với khung SFB. Sai số không tăng đơn điệu theo I_r/I_c, cho thấy tham số t mô tả đúng cấu trúc của phương trình đặc trưng thay vì chỉ là một biến hồi quy kinh nghiệm.

7. ĐỐI SÁNH VỚI TCVN 5575:2024

TCVN 5575:2024, Bảng 32, quy định hệ số μ cho cột tiết diện không đổi trong khung tự do có tải trọng như nhau tại các nút cùng cao độ [1]. Với khung một nhịp dầm ngang, tham số độ cứng của tiêu chuẩn có thể viết $n = (I_r/I_c).(H/B)$. Trường hợp chân khớp và chân ngàm tương ứng có dạng:

$$\mu_{SPB} = 2\sqrt{1 + \frac{0{,}38}{n}}, \quad \mu_{SFB} = \sqrt{\frac{n + 0{,}56}{n + 0{,}14}} \tag{21}$$

Khi γ = 0°, ξ = n và lý thuyết hiện tại trở về bài toán dầm ngang. Bảng 8 cho thấy kết quả lý thuyết và TCVN khá gần nhau trong miền B/H = 1-10. Sai khác phản ánh bản chất gần đúng của công thức tiêu chuẩn.

Bảng 8. So sánh kết quả từ lý thuyết với TCVN 5575:2024 cho dầm ngang, $I_r/I_c = 1$

B/H	μ_LT (SPB)	TC (SPB)	$\Delta_{(SPB)}$	μ_LT (SFB)	TC (SFB)	$\Delta_{(SFB)}$
1	2,3279	2,3495	+0,93%	1,1565	1,1698	+1,15%
2	2,6346	2,6533	+0,71%	1,2793	1,2870	+0,60%
4	3,1790	3,1749	-0,13%	1,4447	1,4412	-0,24%
6	3,6516	3,6222	-0,81%	1,5485	1,5393	-0,59%
8	4,0728	4,0200	-1,30%	1,6196	1,6078	-0,73%
10	4,4557	4,3818	-1,66%	1,6713	1,6583	-0,78%

Đối với dầm xiên, nếu áp dụng trực tiếp công thức dầm ngang của TCVN thì n không thay đổi theo γ, trong khi phương trình đặc trưng cho thấy tham số thực sự của bài toán là $\xi = n.\cos\gamma$. Bảng 9 minh họa sai khác kết quả tại γ = 40° (giữa TCVN và lý thuyết). Ở đây giá trị TCVN vẫn được tính theo dầm ngang cùng B/H và I_r/I_c, nhằm lượng hóa ảnh hưởng khi bỏ qua góc xiên của dầm.

Bảng 9. So sánh kết quả lý thuyết (LT), công thức đề xuất (CT) và TCVN (TC), γ = 40°, $I_r/I_c = 1$

B/H	LT (SPB)	CT (SPB)	TC (SPB)	Δ (SPB)	LT (SFB)	CT (SFB)	TC (SFB)	Δ (SFB)
1	2,424	2,424	2,349	-3,1%	1,198	1,198	1,170	-2,3%
2	2,810	2,810	2,653	-5,6%	1,339	1,339	1,287	-3,9%
4	3,475	3,475	3,175	-8,6%	1,513	1,513	1,441	-4,8%
6	4,039	4,039	3,622	-10,3%	1,615	1,615	1,539	-4,7%
8	4,536	4,536	4,020	-11,4%	1,681	1,681	1,608	-4,3%
10	4,985	4,986	4,382	-12,1%	1,728	1,728	1,658	-4,0%

Đối với khung SPB, sai khác do bỏ qua góc xiên tăng mạnh theo B/H; tại B/H = 10 và γ = 40°, TCVN dầm ngang cho μ = 4,3818 trong khi lý thuyết dầm xiên cho μ ≈ 4,985, thấp hơn khoảng 12,1%. Đối với khung SFB, ảnh hưởng nhỏ hơn do chân ngàm tăng độ cản xoay đáng kể, nhưng xu hướng μ tăng theo γ vẫn được duy trì. Kết quả này cho thấy góc mái cần được xét trực tiếp khi tính toán chiều dài tính toán cho khung mái dốc, đặc biệt đối với khung chân khớp và nhịp tương đối lớn.

Từ cấu trúc phương trình đặc trưng, có thể định nghĩa tham số độ cứng tương đương $n_\gamma = n.\cos\gamma$. Cách biểu diễn này có ý nghĩa tạo cầu nối với tham số n của TCVN; tuy nhiên n_γ là kết quả của nghiên cứu hiện tại, không phải quy định trong TCVN 5575:2024.

$$n_\gamma = n\cos\gamma = \frac{I_r}{I_c}\frac{H}{B}\cos\gamma \quad (22)$$

8. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng cơ sở lý thuyết xác định hệ số chiều dài tính toán của cột trong khung thép một tầng, một nhịp đối xứng có dầm xiên và có chuyển vị ngang đỉnh cột. Các kết luận chính có thể tóm tắt như sau:

(1) Từ hàm ổn định chính xác của cột và độ cứng chống xoay tương đương của dầm xiên, phương trình đặc trưng của 2 loại khung SPB và SFB đã được thiết lập. Hai phương trình chỉ phụ thuộc vào $\xi = (I_r/I_c)(H/B).\cos\gamma$.

(2) Với dầm ngang B/H = 1 và $I_r/I_c = 1$, nghiệm lý thuyết trùng với nghiệm chuẩn của Chen; khi so sánh với kết quả từ ANSYS, sai số tương đối nhỏ: lớn nhất nhỏ hơn 0,084% đối với SPB và 0,144% đối với SFB.

(3) Góc xiên làm giảm độ độ cản xoay tương đối của dầm đối với đầu cột và làm tăng μ. Ảnh hưởng đặc biệt rõ đối với khung SPB: tại $I_r/I_c = 1$, B/H = 10, μ tăng khoảng 11,9% khi γ tăng từ 0° lên 40°. Khung SFB ít nhạy hơn do điều kiện ngàm ở chân cột.

(4) Hai công thức gần đúng đề xuất theo tham số $t = 1/\xi$ cho phép xác định trực tiếp μ với độ chính xác chấp nhận được mà không cần giải phương trình siêu việt.

(5) Khi γ = 0°, kết quả lý thuyết phù hợp tốt với công thức TCVN 5575:2024 cho dầm ngang. Khi γ > 0°, việc bỏ qua góc xiên có thể đánh giá thấp μ đáng kể, đặc biệt đối với khung chân khớp có B/H lớn.

Phạm vi của bài báo giới hạn ở mất ổn định đàn hồi trong mặt phẳng, cột và dầm tiết diện không đổi, tải nén đặt tại đỉnh cột và dầm không có lực dọc trong trạng thái trước mất ổn định. Trường hợp khung không chuyển vị ngang, tải mái gây lực dọc trong dầm, cấu kiện vát hoặc phi tuyến vật liệu cần được nghiên cứu riêng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài mã số T2025-243, do Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM tài trợ năm 2025. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ của Nhà trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 5575:2024. Thiết kế kết cấu thép. Hà Nội, 2024.

[2] J. A. Yura. The effective length of columns in unbraced frames. Engineering Journal, vol. 8, no. 2, pp. 37-42, 1971, doi: 10.62913/engj.v8i2.164.

[3] L. Duan and W. F. Chen. Effective length factor for columns in unbraced frames. Journal of Structural Engineering, vol. 115, no. 1, pp. 149-165, 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:1(149).

[4] N. Kishi, W. F. Chen, and Y. Goto. Effective length factor of columns in semirigid and unbraced frames. Journal of Structural Engineering, vol. 123, no. 3, pp. 313-320, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(313).

[5] H. Saffari, R. Rahgozar and R. Jahanshahi. An efficient method for computation of effective length factor of columns in a steel gabled frame with tapered members. Journal of Constructional Steel Research, vol. 64, no. 4, pp. 400-406, 2008, doi: 10.1016/j.jcsr.2007.09.001.

[6] S. M. Ibrahim. Effective buckling length of frames with tapered columns and partially tapered beams. Journal of Constructional Steel Research, vol. 187, 106993, 2021, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106993.

[7] A. Haghollahi and A. A. Safavi. Evaluation of non-sway flexural buckling of one-bay gabled frames by solving characteristic equation. Amirkabir Journal of Civil Engineering, vol. 54, no. 8, pp. 649-652, 2022, doi: 10.22060/ceej.2022.19048.7047.

[8] A. Slimani, T. Belaid, M. Saidani, F. Ammari and R. Adman. The effective length factor of columns in steel framed buildings with end restraint effect. Structures, vol. 58, 105521, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.105521.

[9] W. F. Chen and E. M. Lui, Structural Stability: Theory and Implementation. New York: Elsevier, 1987.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/20/2026

Nghiên cứu đáp ứng động đất của khung thép bằng phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian

Seismic response analysis of steel frames using nonlinear time-history analysis

> TRẦN ANH ĐỨC[1], TRẦN TRUNG HIẾU[2], TRƯƠNG VIỆT HÙNG[3,*]
[1]Khoa Quản lý đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[3]Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi
[*]Emai: truongviethung@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian (NTHA) nhằm khảo sát đáp ứng động đất của kết cấu khung thép, có xét đến ảnh hưởng của phi tuyến hình học và phi tuyến vật liệu. Các cấu kiện dầm và cột được mô hình hóa bằng phần tử dầm-cột có khớp dẻo, trong khi phương trình chuyển động được giải bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark kết hợp với thuật toán lặp Newton-Raphson. Trên cơ sở điều kiện địa chấn và các quy định kỹ thuật về động đất tại Việt Nam, giá trị gia tốc nền cực đại PGA = 0,378g được lựa chọn làm mức kích động mục tiêu. Bảy bản ghi động đất thực được hiệu chỉnh về cùng mức PGA và sử dụng để phân tích hai mô hình kết cấu gồm khung thép không gian sáu tầng và khung thép phẳng ba nhịp, mười tầng. Kết quả phân tích được đánh giá thông qua lịch sử chuyển vị ngang, chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất và chuyển vị lệch tầng lớn nhất. Đối với khung không gian sáu tầng, bản ghi Kocaeli gây ra chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất, đạt 215,123 mm, trong khi bản ghi Loma Prieta cho giá trị nhỏ nhất, bằng 53,351 mm. Đối với khung phẳng mười tầng, các kết quả tổng hợp cũng cho thấy sự khác biệt đáng kể về đáp ứng giữa các bản ghi động đất. Nghiên cứu cho thấy việc hiệu chỉnh các bản ghi về cùng mức PGA không dẫn đến đáp ứng kết cấu tương đương, đồng thời làm rõ khả năng ứng dụng của phương pháp NTHA trong khảo sát phản ứng động đất của khung thép.

Từ khóa: NTHA; khung thép; động đất; gia tốc nền cực đại; chuyển vị ngang; chuyển vị lệch tầng.

ABSTRACT

This study employs nonlinear time-history analysis (NTHA) to investigate the seismic response of steel frame structures, considering both geometric and material nonlinearities. Beam and column members are modeled using beam-column elements with plastic hinges, while the equations of motion are solved using the Newmark direct integration method combined with the Newton-Raphson iterative algorithm. Based on the seismic conditions and seismic design provisions in Vietnam, a peak ground acceleration (PGA) of 0.378g is selected as the target excitation level. Seven recorded ground motions are scaled to the same PGA level and used to analyze two structural models: a six-story three-dimensional steel frame and a ten-story, three-bay planar steel frame. The analytical results are evaluated in terms of lateral displacement time histories, maximum absolute lateral displacements, and maximum interstory drifts. For the six-story three-dimensional steel frame, the Kocaeli earthquake record produces the largest absolute lateral displacement of 215.123 mm, whereas the Loma Prieta record results in the smallest value of 53.351 mm. For the ten-story planar steel frame, the overall results also reveal significant variations in structural responses among the earthquake records. The findings demonstrate that scaling ground motion records to the same PGA level does not necessarily produce equivalent structural responses. Furthermore, the study highlights the applicability of NTHA in investigating the seismic behavior of steel frame structures.

Keywords: Nonlinear time-history analysis (NTHA); steel frames; earthquakes; peak ground acceleration (PGA); lateral displacement; interstory drift.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động đất có thể làm thay đổi đáng kể trạng thái làm việc của công trình, đặc biệt là hệ kết cấu chịu tải trọng ngang. Dưới tác dụng của chuyển động nền, kết cấu có thể xuất hiện dao động với biên độ lớn, làm gia tăng nội lực, chuyển vị ngang và biến dạng tương đối giữa các tầng. Khi cường độ kích động vượt quá khả năng làm việc đàn hồi, các cấu kiện có thể phát triển biến dạng dẻo, đồng thời độ cứng của hệ kết cấu thay đổi trong suốt quá trình chịu tải. Những hiện tượng này ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực và mức độ an toàn của công trình dưới tác động động đất [1 - 3].

Trong thiết kế kháng chấn, phương pháp lực ngang tương đương và phổ phản ứng được sử dụng phổ biến nhờ tính đơn giản và hiệu quả tính toán. Tuy nhiên, các phương pháp này chủ yếu dựa trên giả thiết ứng xử đàn hồi tuyến tính và sử dụng những hệ số hiệu chỉnh để xét đến ảnh hưởng của ứng xử phi đàn hồi. Do đó, chúng có những hạn chế nhất định khi cần theo dõi sự phát triển của biến dạng dẻo, sự thay đổi độ cứng và quá trình phân bố lại nội lực trong kết cấu dưới tác dụng của chuyển động nền mạnh [4, 5]. Đối với khung thép, nơi các cấu kiện dầm và cột có thể đồng thời chịu lực dọc và mô men uốn, việc xét đến ứng xử phi tuyến vật liệu và phi tuyến hình học có ý nghĩa quan trọng trong mô tả phản ứng thực tế của hệ kết cấu.

Phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian (Nonlinear Time-History Analysis, NTHA) là phương pháp cho phép xác định trực tiếp sự biến thiên đáp ứng của kết cấu trong suốt thời gian tác động của động đất. Theo phương pháp này, phương trình chuyển động của hệ được tích phân theo từng bước thời gian dưới tác dụng của lịch sử gia tốc nền, đồng thời trạng thái cân bằng và độ cứng của kết cấu được cập nhật phù hợp với ứng xử phi tuyến của các cấu kiện. Nhờ đó, phương pháp có khả năng mô tả quá trình phát triển chuyển vị, biến dạng và nội lực, cũng như xác định thời điểm xuất hiện các giá trị đáp ứng bất lợi. Các phương pháp tích phân số trong động lực học kết cấu, tiêu biểu là phương pháp Newmark, cung cấp cơ sở để giải phương trình chuyển động và theo dõi phản ứng của hệ kết cấu theo thời gian [5, 6].

Mô hình khung thép cần phản ánh ứng xử dầm-cột dưới tác dụng đồng thời của tải trọng đứng và tải trọng ngang. Trong đó, ứng xử phi đàn hồi của vật liệu, sự hình thành và phát triển khớp dẻo, ảnh hưởng của lực dọc đến khả năng chịu uốn và các hiệu ứng bậc hai là những vấn đề cần được xem xét trong quá trình mô hình hóa. Các nghiên cứu về đánh giá đáp ứng động đất của khung thép đã sử dụng NTHA để xác định chuyển vị ngang và đánh giá trạng thái an toàn của kết cấu dưới nhiều bản ghi động đất khác nhau [7–9]. Những nghiên cứu này cung cấp cơ sở tham khảo cho việc xây dựng và áp dụng mô hình phân tích động phi tuyến đối với các hệ khung thép có cấu hình khác nhau.

Bên cạnh mô hình kết cấu, mức kích động đầu vào ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả phân tích. Đáp ứng động lực học của kết cấu không chỉ phụ thuộc vào giá trị gia tốc nền cực đại (Peak Ground Acceleration, PGA) mà còn chịu ảnh hưởng của đặc trưng biến thiên theo thời gian của chuyển động nền, bao gồm thành phần tần số và thời lượng tác động. Vì vậy, việc sử dụng nhiều bản ghi động đất thực với các đặc trưng khác nhau cho phép khảo sát sự biến thiên đáp ứng của kết cấu trong những điều kiện kích động khác nhau. Bộ dữ liệu chuyển động nền được giới thiệu trong FEMA P695 là một trong những nguồn bản ghi có thể sử dụng phục vụ phân tích và đánh giá đáp ứng động đất của công trình [10].

Tại Việt Nam, nguy cơ động đất tập trung ở những khu vực có đứt gãy kiến tạo, đặc biệt tại vùng Tây Bắc và một số địa phương phía Bắc. Do đó, việc xác định tác động động đất phù hợp với điều kiện địa chấn tại Việt Nam là cần thiết khi nghiên cứu phản ứng của kết cấu công trình. QCVN 02:2022/BXD cung cấp cơ sở dữ liệu về gia tốc nền tham chiếu theo địa điểm xây dựng, trong khi TCVN 9386-1:2025 đưa ra các quy định kỹ thuật liên quan đến xác định tác động động đất và phân tích kết cấu chịu động đất. Trên cơ sở những thông tin này, mức gia tốc nền cực đại được lựa chọn cần xét đến gia tốc nền tham chiếu, tầm quan trọng của công trình và điều kiện nền đất. Trong phạm vi nghiên cứu, giá trị $\mathrm{PGA} = 0{,}378g$ được sử dụng làm mức kích động mục tiêu để hiệu chỉnh các bản ghi gia tốc nền trước khi thực hiện NTHA [11, 12].

Nghiên cứu áp dụng NTHA để khảo sát đáp ứng động đất của hai mô hình: khung thép không gian sáu tầng và khung thép phẳng ba nhịp, mười tầng. Các cấu kiện được mô hình hóa bằng phần tử dầm-cột có khớp dẻo, xét đến phi tuyến vật liệu và hình học. Bảy bản ghi động đất thực được hiệu chỉnh về PGA = 0,378g và sử dụng làm kích động đầu vào. Kết quả được đánh giá qua lịch sử chuyển vị ngang, chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất và chuyển vị lệch tầng lớn nhất. Cách tiếp cận này gắn việc lựa chọn mức kích động với điều kiện địa chấn và quy định kỹ thuật tại Việt Nam.

2. NTHA CỦA KẾT CẤU KHUNG THÉP

Để mô phỏng ứng xử phi tuyến của kết cấu khung thép dưới tác động động đất, nghiên cứu sử dụng phương pháp NTHA, trong đó các cấu kiện dầm và cột được mô hình hóa bằng phần tử dầm-cột có khớp dẻo. Phương pháp này cho phép xem xét ứng xử phi tuyến của kết cấu với chi phí tính toán thấp hơn đáng kể so với phương pháp vùng dẻo, đồng thời vẫn bảo đảm khả năng mô tả hợp lý các đặc trưng làm việc của hệ khung thép [9].

Ảnh hưởng phi tuyến hình học được mô tả bằng các hàm ổn định của Chen và Lui [13], có xét đến hiệu ứng bậc hai của phần tử. Đối với phi tuyến vật liệu, ảnh hưởng của ứng suất dư đến ứng xử phi đàn hồi của cấu kiện chịu lực dọc được xét thông qua mô hình mô đun tiếp tuyến của Column Research Council (CRC), theo đề xuất của Chen và Lui [14]. Khi cấu kiện đồng thời chịu lực dọc và mô men uốn, mô hình suy giảm độ cứng dần của khớp dẻo do Kim và Choi [15] phát triển được áp dụng để mô tả quá trình dẻo hóa từng phần của tiết diện. Trong mô hình này, khái niệm bề mặt chảy dẻo do Orbison và cộng sự [16] đề xuất được sử dụng để xác định sự suy giảm độ cứng của phần tử trong quá trình làm việc phi đàn hồi.

Biến dạng cắt ngang được xét thông qua ma trận độ cứng của Kim và Choi [17]. Ảnh hưởng của mất ổn định uốn xoắn ngang được đưa trực tiếp vào quá trình thiết lập ma trận độ cứng trên cơ sở dạng tuyến tính hóa của phương trình công ảo gia tăng [18]. Đối với bất toàn hình học, mô hình xét đến độ nghiêng ban đầu của các tầng nhằm phản ánh sai lệch hình học tổng thể của hệ khung. Tuy nhiên, bất toàn hình học cục bộ không được xét đến do các cấu kiện sử dụng tiết diện thép chữ W đặc chắc thuộc danh mục tiết diện theo AISC-LRFD [19]. Ngoài ra, biến dạng vênh liên quan đến hiện tượng mất ổn định uốn xoắn ngang không được xem xét riêng trong mô hình phân tích.

Quy trình phân tích gồm hai giai đoạn liên tiếp. Ở giai đoạn thứ nhất, phân tích tĩnh phi tuyến với tĩnh tải, hoạt tải và tải trọng gió xác định trạng thái ban đầu của kết cấu trước động đất. Để giải hệ phương

trình cân bằng phi tuyến trong giai đoạn này, phương pháp điều khiển chuyển vị tổng quát (Generalized Displacement Control, GDC) [20] được sử dụng. Phương pháp cho phép tự động điều chỉnh bước gia tải, thích ứng với sự thay đổi của tải trọng và cải thiện tính ổn định của quá trình giải tại các điểm tới hạn. Nội dung chi tiết về phương pháp phân tích tĩnh phi tuyến của khung thép được trình bày trong tài liệu [21].

Ở giai đoạn thứ hai, NTHA được thực hiện từ trạng thái biến dạng sau phân tích tĩnh. Phương trình chuyển động gia tăng của hệ kết cấu có dạng:

$$[M]\{\Delta\ddot{X}\}+[C]\{\Delta\dot{X}\}+[K]\{\Delta X\}=\{\Delta F\}, \quad (1)$$

Trong đó, $\{\Delta X\}$, $\{\Delta\dot{X}\}$ và $\{\Delta\ddot{X}\}$ lần lượt là các vectơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc gia tăng của kết cấu; [M], [C] và [K] tương ứng là ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ cứng tiếp tuyến; $\{\Delta F\}$ là vectơ tải trọng ngoài gia tăng.

Phương trình chuyển động được giải bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark [6], với các tham số $\gamma = 1/2$ và $\beta = 1/4$. Tại mỗi bước thời gian, phương pháp lặp Newton–Raphson được sử dụng để xử lý lực dư và thiết lập trạng thái cân bằng của kết cấu trong quá trình phân tích động phi tuyến.

Ma trận cản của hệ kết cấu được xác định theo mô hình cản tỷ lệ với ma trận khối lượng và ma trận độ cứng [5]:

$$[C]=\alpha_M[M]+\beta_K[K], \quad (2)$$

Trong đó, α_m và β_k lần lượt là các hệ số cản tỷ lệ theo khối lượng và độ cứng. Khi giả thiết tỷ số cản của hai dạng dao động riêng đầu tiên bằng nhau và có giá trị ξ, các hệ số này được xác định như sau:

$$\alpha_M=\xi\frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2} \quad , \quad \beta_K=\xi\frac{2}{\omega_1+\omega_2} \quad (3)$$

Trong đó, ω_1 và ω_2 lần lượt là tần số góc dao động riêng của dạng dao động thứ nhất và thứ hai của kết cấu.

3. XÁC ĐỊNH THAM SỐ ĐỘNG ĐẤT THEO TIÊU CHUẨN VIỆT NAM

Dù hoạt động địa chấn tại Việt Nam nhìn chung từ thấp đến trung bình, nguy cơ động đất vẫn hiện hữu tại các vùng đứt gãy, nhất là Tây Bắc [22]. Những trận động đất từng được ghi nhận tại Điện Biên năm 1935 và Tuần Giáo năm 1983 [23, 24] cho thấy sự cần thiết phải xem xét ảnh hưởng của chuyển động nền trong phân tích và đánh giá ứng xử của công trình xây dựng.

Cơ sở xác định tác động động đất tại Việt Nam được thiết lập thông qua QCVN 02:2022/BXD [11] và TCVN 9386-1:2025 [12]. Trong đó, QCVN 02:2022/BXD cung cấp số liệu gia tốc nền tham chiếu theo địa điểm xây dựng, còn TCVN 9386-1:2025 quy định các yêu cầu và phương pháp phân tích kết cấu chịu động đất. Theo Mục 4.3.3.1.d của TCVN 9386-1:2025, NTHA cho phép xác định phản ứng kết cấu thông qua tích phân trực tiếp phương trình chuyển động dưới tác động của các bản ghi gia tốc nền. Theo quy định được viện dẫn, khi có ít nhất năm phân tích NTHA, phản ứng trung bình được dùng để thiết kế; nếu ít hơn năm, sử dụng phản ứng bất lợi nhất [12].

Trong nghiên cứu này, gia tốc nền cực đại (Peak Ground Acceleration, PGA) được dùng để kiểm soát mức kích động của các bản ghi động đất. PGA bề mặt được tính từ gia tốc nền tham chiếu, hệ số tầm quan trọng công trình và hệ số nền đất theo quan hệ:

$$PGA=a_{gR}\gamma_I S \quad (4)$$

trong đó: a_{gR} là gia tốc nền tham chiếu, γ_I là hệ số tầm quan trọng, S là hệ số nền đất.

Gia tốc nền tham chiếu được xác định theo QCVN 02:2022/BXD, tương ứng với chu kỳ lặp khoảng 500 năm và xác suất vượt quá 10% trong 50 năm. Các hệ số liên quan đến tầm quan trọng công trình và điều kiện nền được xem xét theo TCVN 9386-1:2025 [11, 12].

Bảng 1. Các giá trị PGA bề mặt đại diện theo gia tốc nền tham chiếu và loại nền đất đối với công trình cấp C3-b

Thiết kế cho Cấp C3-b ($\gamma_I = 1,4$)	Loại nền đất	Hệ số S	$a_{gR} = 0,18$ (g)	$a_{gR} = 0,20$ (g)	$a_{gR} = 0,22$ (g)
	A	1,00	0,252	0,280	0,308
	B	1,20	0,302	0,336	0,370
	C	1,15	0,290	0,322	0,354
	D	1,35	0,340	0,378	0,416
	E	1,40	0,353	0,392	0,431

Chú giải địa phương tương ứng với từng mức a_{gR}:

a_{gR} (g)	Các địa phương đại diện
0,18	Sìn Hồ (Lai Châu)
0,20	Vân Hồ, Yên Châu (Sơn La); Mường Chà, Mường Lay, Tuần Giáo, Tủa Chùa (Điện Biên)
0,22	Mộc Châu, Thuận Châu (Sơn La)

Trên cơ sở các tổ hợp được tổng hợp tại Bảng 1, nghiên cứu lựa chọn mức $PGA = 0,378g$ làm giá trị khảo sát thống nhất cho các mô hình khung thép. Giá trị này tương ứng với gia tốc nền tham chiếu $a_{gR} = 0,2g$ tại một số địa phương như Tuần Giáo (Điện Biên) và Hậu Lộc (Thanh Hóa), kết hợp hệ số tầm quan trọng $\gamma_I = 1,4$ đối với công trình cấp C3-b và hệ số nền $S = 1,35$ của đất loại D, phổ phản ứng loại 1 [11, 12]. Tổ hợp được xác định như sau:

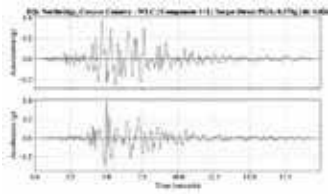
$$PGA = 0.2\times1.4\times1.35 = 0.378(g) \quad (5)$$

Giá trị PGA được lựa chọn đại diện cho một tổ hợp điều kiện địa chấn và nền đất cụ thể tại Việt Nam. Bảy bản ghi động đất thực đã được thu phóng về mức PGA này để so sánh đáp ứng của các mô hình khung thép dưới cùng cường độ gia tốc đỉnh.

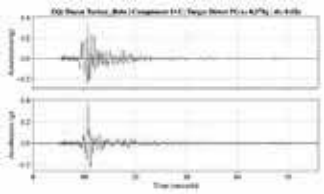
4. VÍ DỤ NGHIÊN CỨU

4.1. Lựa chọn và xử lý bản ghi động đất

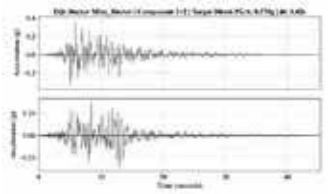
Trong NTHA, đặc trưng chuyển động nền ảnh hưởng trực tiếp đến đáp ứng của kết cấu. Ngoài biên độ gia tốc, sự khác biệt về thành phần tần số, thời gian duy trì dao động và cơ chế phát sinh động đất có thể dẫn đến những phản ứng khác nhau ngay cả khi các bản ghi có cùng mức gia tốc nền cực đại. Vì vậy, nghiên cứu sử dụng nhiều bản ghi thực để đánh giá biến thiên đáp ứng và hạn chế sự phụ thuộc vào một kích động đơn lẻ. Việc lựa chọn các bản ghi có tham khảo bộ dữ liệu chuyển động nền trường xa (far-field ground motion dataset) được giới thiệu trong FEMA P695 [10]. Bảy bản ghi động đất được sử dụng gồm Northridge (1994), Duzce (1999), Hector Mine (1999), Kobe (1995), Kocaeli (1999), Superstition Hills (1987) và Loma Prieta (1989). Các bản ghi này tương ứng với những trạm quan trắc Canyon Country WLC, Bolu, Hector, Nishi-Akashi, Arcelik, Poe Road và Capitola. Bộ bảy bản ghi cho phép đối chiếu đáp ứng của cùng mô hình dưới các lịch sử gia tốc khác nhau. Các bản ghi đã được thu phóng biên độ về cùng PGA mục tiêu $PGA = 0,378$ (g), đã được xác định tại Mục 3. Quá trình phân tích sử dụng bước thời gian không đổi, trong khi đặc điểm biến thiên gia tốc theo thời gian của từng bản ghi được duy trì sau khi hiệu chỉnh biên độ. Các lịch sử gia tốc sau xử lý được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho NTHA của các mô hình khung thép.



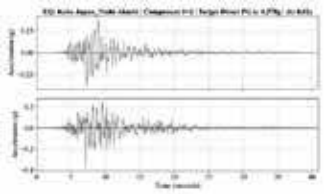
(a) Northridge (1994) – Canyon Country WLC



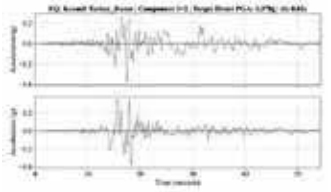
(b) Duzce (1999) - Bolu



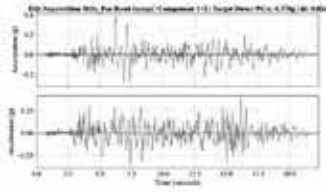
(c) Hector Mine (1999) - Hector



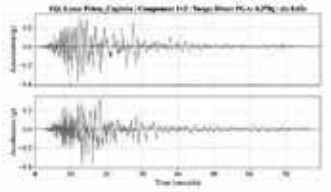
(d) Kobe (1995) - Nishi-Akashi



(e) Kocaeli (1999) - Arcelik



(f) Superstition Hills (1987) - Poe Road



(g) Loma Prieta (1989) - Capitola

Hình 1. Lịch sử gia tốc của bảy bản ghi động đất được lựa chọn sau khi hiệu chỉnh về PGA=0,378 (g)

4.2. Các đại lượng đánh giá đáp ứng động đất

Đáp ứng của hai mô hình được đánh giá từ kết quả NTHA theo ba đại lượng: lịch sử chuyển vị ngang, chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất và chuyển vị lệch tầng lớn nhất. Các đại lượng được xác định cho từng bản ghi để so sánh bảy trường hợp kích động. Đối với bản ghi động đất thứ k, chuyển vị ngang của nút kiểm soát tại thời điểm t được ký hiệu là $d_k(t)$, với $k = 1, 2, \ldots, 7$. Sự biến thiên của đại lượng này theo thời gian thể hiện quá trình phản ứng của kết cấu trong suốt thời gian chịu tác động của chuyển động nền. Các đường lịch sử chuyển vị đã được đối chiếu để xác định biên độ, thời điểm xuất hiện chuyển vị lớn và sự khác biệt đáp ứng giữa các bản ghi. Từ lịch sử chuyển vị, chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất tại đỉnh khung dưới bản ghi thứ k được xác định theo:

$$d_{\max} = \max_{k=1,\ldots,7}\left(\max_t |\, d_k(t)\,|\right) \quad (6)$$

trong đó đại lượng d_{max} phản ánh biên độ chuyển vị lớn nhất của kết cấu đối với từng trường hợp kích động. Việc xác định riêng d_{max} cho mỗi bản ghi cho phép so sánh mức độ phản ứng của kết cấu khi chịu tác động của những lịch sử gia tốc nền khác nhau. Giá trị bao chuyển vị của toàn bộ bảy bản ghi được xác định theo:

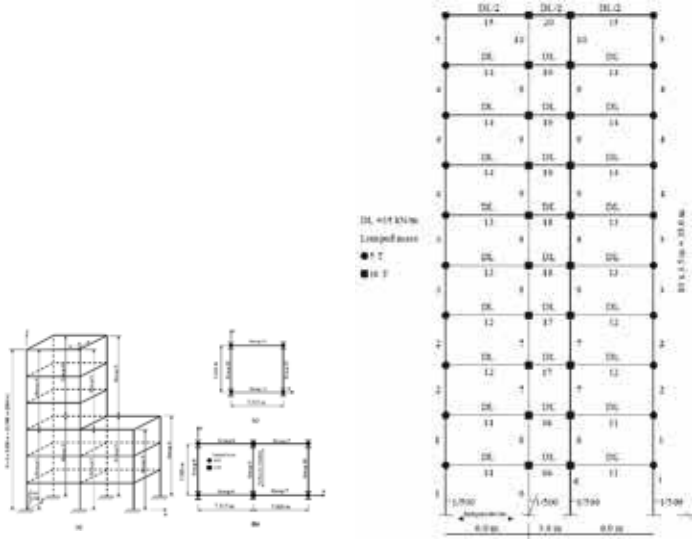
$$d_{\max,env} = \max_{k=1,\ldots,7} d_{\max,k} = \max_{k=1,\ldots,7}\left(\max_t |\, d_k(t)\,|\right) \quad (7)$$

Trong đó, giá trị $d_{max,env}$ được sử dụng để nhận diện bản ghi gây ra đáp ứng chuyển vị bất lợi nhất trong số bảy trường hợp khảo sát đối với từng mô hình khung thép. Chuyển vị lệch tầng lớn nhất được sử dụng để đánh giá mức biến dạng tương đối và trạng thái làm việc của kết cấu khung thép [9]. Từ kết quả NTHA, chuyển vị lệch tầng được xác định bằng chênh lệch chuyển vị ngang giữa hai tầng liên tiếp. Giá trị lớn nhất của từng bản ghi phản ánh mức biến dạng tương đối lớn nhất trong mô hình.

4.3. Mô hình khảo sát và kết quả phân tích

Nghiên cứu khảo sát hai mô hình có cấu hình khác nhau: khung thép không gian sáu tầng và khung thép phẳng ba nhịp, mười tầng. Hai mô hình được kế thừa từ các trường hợp khảo sát trong nghiên cứu khung thép tham khảo. Sơ đồ hình học của các kết cấu được minh họa tại Hình 2, trong khi các thông số chủ yếu về kích thước, vật liệu, số lượng phần tử, phân nhóm tiết diện và điều kiện phân tích được tổng hợp trong Bảng 2 [9].

Các cấu kiện dầm và cột của hai mô hình được mô phỏng bằng phần tử dầm–cột có khớp dẻo, sử dụng thép kết cấu với mô đun đàn hồi $E = 200\text{GPa}$ và giới hạn chảy $F_y = 345\ \text{MPa}$. Mô hình khung không gian sáu tầng gồm 69 nút, 96 phần tử, với năm nhóm tiết diện cột và tám nhóm tiết diện dầm. Trong khi đó, khung phẳng mười tầng được thiết lập từ 74 nút và 100 phần tử, các cấu kiện được chia thành mười nhóm cột và mười nhóm dầm. Điều kiện liên kết, tải trọng tĩnh và khối lượng nút được xác định theo dữ liệu đầu vào của từng mô hình. Hai mô hình đã được phân tích bằng NTHA với bảy bản ghi động đất thực ở Mục 4.1, sau khi hiệu chỉnh về cùng mức $\text{PGA} = 0{,}378\ (\text{g})$.



a) Khung không gian 6 tầng b) Khung phẳng 3 nhịp, 10 tầng

Hình 2. Sơ đồ bố trí của các trường hợp nghiên cứu

Bảng 2. Thông số chính của các mô hình khung thép khảo sát

Thông số	Khung không gian 6 tầng	Khung phẳng 3 nhịp, 10 tầng
Dạng mô hình	Khung không gian	Khung phẳng
Số tầng	6	10
Chiều cao tầng (m)	3,658	3,5
Tổng chiều cao (m)	21.948	35
Kích thước nhịp (m)	7.315	6; 3; 6
Số nút khai báo	69	74
Số phần tử khai báo	96	100
Số nhóm tiết diện cột	5	10

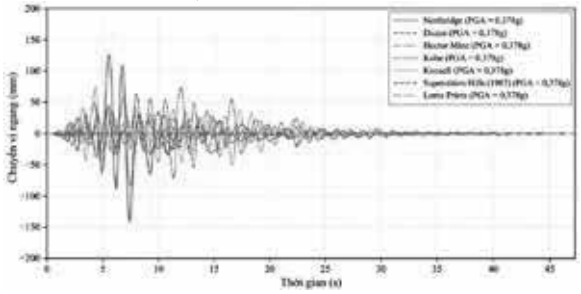
Thông số	Khung không gian 6 tầng	Khung phẳng 3 nhịp, 10 tầng
Số nhóm tiết diện dầm	8	10
Mô đun đàn hồi E (GPa)	200	200
Giới hạn chảy F_y (MPa)	345	345
Điều kiện liên kết chân cột	Ngàm	Ngàm
Kích thích động đất	7 bản ghi chuyển động nền thực tế (PGA = 0,378 (g), bước thời gian $\Delta t = 0,02$ (s)	

4.3.1. Khung thép không gian 6 tầng

Trường hợp nghiên cứu thứ nhất sử dụng mô hình khung thép không gian sáu tầng có cấu hình hình học được trình bày tại Hình 2(a). Kết cấu có chiều cao mỗi tầng bằng 3,658 m, tương ứng tổng chiều cao 21,948 m. Mặt bằng thay đổi theo chiều cao: ba tầng dưới gồm hai nhịp theo phương X và một nhịp theo phương Y; ba tầng trên chỉ còn một nhịp theo mỗi phương. Các nhịp có chiều dài 7,315 m. Mô hình được thiết lập với 69 nút và 96 phần tử, các cấu kiện được phân thành năm nhóm tiết diện cột và tám nhóm tiết diện dầm. Những đặc trưng này phù hợp với mô hình khung không gian sáu tầng đã được khảo sát trong nghiên cứu tham khảo về đánh giá an toàn kết cấu khung thép bằng phương pháp học máy [9].

Mô hình đã được phân tích bằng NTHA với bảy bản ghi Northridge, Duzce, Hector Mine, Kobe, Kocaeli, Superstition Hills và Loma Prieta. Các bản ghi được lựa chọn và xử lý theo quy trình tại Mục 4.1, với cùng giá trị gia tốc nền cực đại $\mathrm{PGA} = 0,378\mathrm{g}$. Việc thống nhất mức PGA cho phép khảo sát ảnh hưởng của sự khác biệt về lịch sử gia tốc nền đối với đáp ứng của cùng một mô hình khung thép.

Lịch sử chuyển vị ngang đã được xác định cho từng bản ghi. Chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất và thời điểm tương ứng được xác định theo Mục 4.2. Đồng thời, chuyển vị lệch tầng lớn nhất được xem xét để đánh giá mức độ biến dạng tương đối giữa các tầng của hệ khung. Các đại lượng này được sử dụng làm cơ sở so sánh phản ứng của kết cấu dưới bảy trường hợp kích động.

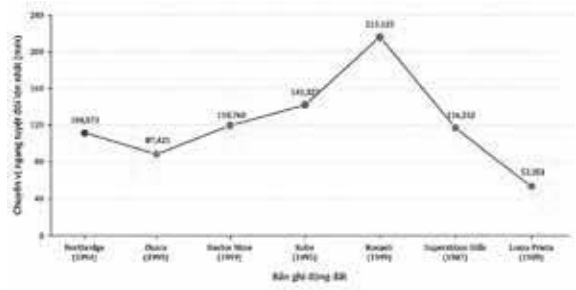


Hình 3. Lịch sử chuyển vị ngang của khung thép không gian sáu tầng dưới tác động của bảy bản ghi động đất

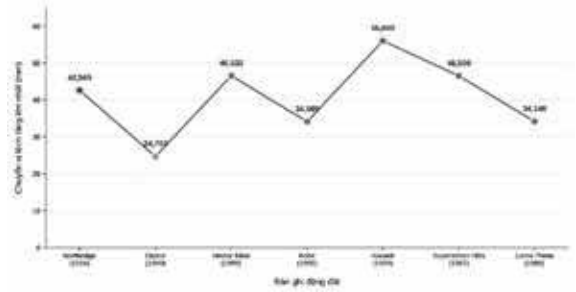
Bảng 3 và Hình 3 cho thấy sự khác biệt giữa các bản ghi về biên độ chuyển vị, thời điểm đạt cực đại và chuyển vị lệch tầng lớn nhất. Đặc biệt, việc các bản ghi được hiệu chỉnh về cùng mức PGA tạo điều kiện xem xét sự khác biệt về đáp ứng gắn với đặc trưng biến thiên theo thời gian của chuyển động nền, thay vì chỉ so sánh cường độ gia tốc đỉnh.

Bảng 3. Kết quả NTHA của khung thép không gian 6 tầng

Bản ghi động đất	$d_{max,k}$ (mm)	Thời điểm đạt $d_{max,k}$ (s)	Chuyển vị lệch tầng lớn nhất (mm)
Northridge	128,586	9,820	42,569
Duzce	83,3270	11,30	24,703
Hector Mine	151,745	12,64	46,532
Kobe	102,224	8,28	34,089
Kocaeli	215,123	17,88	56,040
Superstition Hills	146,229	7,060	46,500
Loma Prieta	53,3510	11,10	34,148



Hình 4. So sánh chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất của khung thép không gian sáu tầng dưới bảy bản ghi động đất



Hình 5. So sánh chuyển vị lệch tầng lớn nhất của khung thép không gian sáu tầng dưới bảy bản ghi động đất

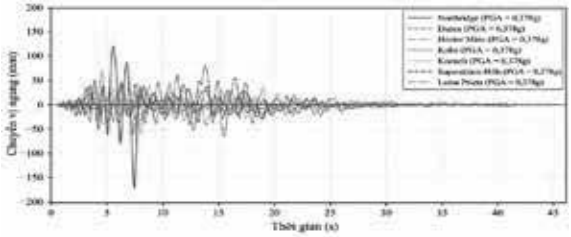
Theo Bảng 3 và Hình 4, Kocaeli gây ra chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất (215,123 mm), là trường hợp bất lợi nhất theo chỉ tiêu này. Bảng 3 và Hình 5 cũng cho thấy Kocaeli tạo ra chuyển vị lệch tầng lớn nhất (56,040 mm). Việc kết hợp hai đại lượng này cung cấp cơ sở để đánh giá đáp ứng động đất của mô hình khung thép không gian sáu tầng dưới các lịch sử kích động khác nhau.

4.3.2. Khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng

Mô hình thứ hai là khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng, thể hiện tại Hình 2(b). Khung gồm ba nhịp với chiều dài lần lượt là 6 m, 3 m và 6 m; chiều cao mỗi tầng bằng 3,5 m, tương ứng tổng chiều cao kết cấu là 35 m. Mô hình được thiết lập với 74 nút và 100 phần tử dầm-cột, trong đó các cấu kiện được phân thành mười nhóm tiết diện cột và mười nhóm tiết diện dầm. Các chân cột được liên kết ngàm với nền. Đặc điểm hình học và cách phân nhóm cấu kiện được kế thừa từ mô hình khung phẳng ba nhịp, mười tầng trong nghiên cứu tham khảo về đánh giá an toàn khung thép dưới tác động động đất [9].

Khung phẳng mười tầng cũng đã được khảo sát bằng NTHA. Bảy bản ghi động đất được lựa chọn gồm Northridge, Duzce, Hector Mine, Kobe, Kocaeli, Superstition Hills và Loma Prieta, với giá trị PGA

mục tiêu bằng 0,378g. Đối với mỗi trường hợp kích động, lịch sử chuyển vị ngang của kết cấu được xem xét trong toàn bộ thời gian phân tích nhằm xác định sự biến thiên của đáp ứng và thời điểm xuất hiện chuyển vị cực đại.



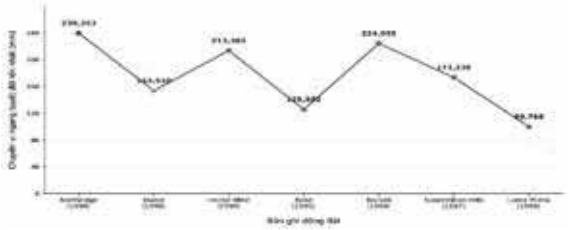
Hình 6. Lịch sử chuyển vị ngang của khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng dưới tác động của bảy bản ghi động đất

Chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất được xác định từ lịch sử chuyển vị theo mục 4.2.2. Bên cạnh đó, chuyển vị lệch tầng lớn nhất được xem xét theo mục 4.2.3 nhằm đánh giá mức độ biến dạng tương đối giữa các tầng của khung. Đây cũng là đại lượng được sử dụng để đánh giá phản ứng của mô hình khung phẳng 3 nhịp, 10 tầng trong nghiên cứu tham khảo. Các giá trị chuyển vị cực đại và thời điểm xuất hiện tương ứng được tổng hợp tại Bảng 4, làm cơ sở so sánh đáp ứng kết cấu giữa các trường hợp động đất.

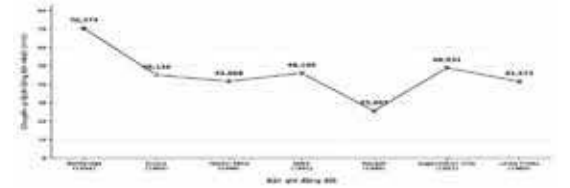
Bảng 4. Kết quả NTHA của khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng

Bản ghi động đất	$d_{max,k}$ (mm)	Thời điểm đạt $d_{max,k}$ (s)	Chuyển vị lệch tầng lớn nhất (mm)
Northridge	239,353	5,720	70,373
Duzce	153,510	10,64	45,110
Hector Mine	213,381	13,62	41,668
Kobe	125,582	10,16	46,105
Kocaeli	224,035	16,26	25,607
Superstition Hills	173,236	7,240	48,931
Loma Prieta	99,768	13,72	41,573

Bảng 4 tổng hợp biên độ chuyển vị, thời điểm đạt cực đại và chuyển vị lệch tầng lớn nhất của khung phẳng dưới từng bản ghi. Việc sử dụng các bản ghi được hiệu chỉnh về cùng mức PGA tạo điều kiện so sánh đáp ứng của kết cấu dưới những lịch sử gia tốc nền khác nhau.



Hình 7. So sánh chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất của khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng dưới bảy bản ghi động đất



Hình 8. So sánh chuyển vị lệch tầng lớn nhất của khung thép phẳng 3 nhịp, 10 tầng dưới bảy bản ghi động đất

Theo Bảng 4 và Hình 7, Northridge gây ra chuyển vị ngang tuyệt đối lớn nhất (239,353 mm) của khung phẳng. Theo Bảng 4 và Hình 8, Northridge cũng tạo ra chuyển vị lệch tầng lớn nhất (70,373 mm). Sự kết hợp của hai chỉ tiêu này cung cấp cơ sở đánh giá đáp ứng động đất của khung thép phẳng mười tầng và phục vụ việc so sánh với mô hình khung không gian sáu tầng trong phần thảo luận tiếp theo.

5. THẢO LUẬN VỀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐÁP ỨNG ĐỘNG ĐẤT

Kết quả phân tích NTHA minh chứng rõ nét rằng việc chuẩn hóa về cùng một mức PGA không đồng nghĩa với việc tiệm cận được các đáp ứng cơ học tương đương. Biên độ, hàm lượng tần số và đặc trưng phân bố năng lượng theo thời gian của từng băng gia tốc đã chi phối mạnh mẽ đến sự tiến triển của chuyển vị ngang cũng như biến dạng lệch tầng cực đại.

Cụ thể, đặc tính động lực học của kết cấu có sự tương tác đáng kể với chuỗi kích động đầu vào. Đối với khung không gian sáu tầng (chiều cao 21,948 m, mặt bằng bất đối xứng), trận động đất Kocaeli gây ra hiệu ứng bất lợi nhất với chuyển vị ngang tuyệt đối chạm ngưỡng 215,123 mm, gấp khoảng 4,03 lần so với đáp ứng êm dịu nhất từ Loma Prieta (53,351 mm). Trong khi đó, ở cấu hình khung phẳng mười tầng (chiều cao 35 m), kịch bản Northridge lại thống trị với đỉnh chuyển vị đạt 239,353 mm (gấp 2,4 lần Loma Prieta). Sự dịch chuyển kịch bản nguy hiểm nhất, từ Kocaeli (khung sáu tầng) sang Northridge (khung mười tầng), phản ánh độ nhạy của hệ kết cấu đối với sự cộng hưởng dải tần, dù nghiên cứu chưa đi sâu bóc tách định lượng phổ năng lượng của từng băng gia tốc hay cô lập hoàn toàn ảnh hưởng của riêng biến số hình học.

Hơn thế nữa, kết quả bộc lộ một hiện tượng cấu trúc rất đáng chú ý: chuyển vị tổng thể lớn không tất yếu kéo theo biến dạng cục bộ nguy hiểm. Mặc dù trên khung sáu tầng, Kocaeli đồng thời tối đa hóa cả chuyển vị tuyệt đối và lệch tầng (lần lượt 215,123 mm và 56,040 mm), nhưng bức tranh cơ học lại hoàn toàn khác biệt ở khung mười tầng. Tại mô hình này, Kocaeli kích phát dịch chuyển tổng thể rất lớn (224,035 mm) song lại ghi nhận giá trị lệch tầng an toàn nhất (chỉ 25,607 mm). Trái lại, Northridge lại đẩy cả hai đại lượng này lên mức nguy hiểm (239,353 mm tuyệt đối và 70,373 mm lệch tầng). Sự phân kỳ này tái khẳng định nguyên lý thiết kế kháng chấn hiện đại: bắt buộc phải kiểm soát chuyển vị lệch tầng như một thước đo trực tiếp cho rủi ro hư hỏng, không thể chỉ đánh giá dựa trên độ dạt ngang tổng thể.

Lợi thế cốt lõi của NTHA được thể hiện qua khả năng truy vết chính xác tiến trình biến dạng và sự suy giảm độ cứng. Thời điểm xuất hiện đỉnh đáp ứng không chỉ phụ thuộc vào xung gia tốc lớn nhất mà còn do hiệu ứng tích lũy năng lượng; điển hình như đỉnh chuyển vị do Northridge xuất hiện khá sớm (5,72 s - 9,82 s), trong khi hệ thống dưới tác động của Kocaeli cần thời gian dài hơn để kích phát mức nguy hiểm (16,26 s - 17,88 s). Dù việc tích hợp phần tử dầm–cột có khớp dẻo kết hợp hiệu ứng phi tuyến hình học (P-Delta) đã cho phép thuật toán cập nhật liên tục ma trận độ cứng, nhưng do chưa thực hiện các bài toán phân tích độ nhạy đối chứng, cơ chế dẻo hóa hiện tại chủ yếu đóng vai trò làm nền tảng lý thuyết diễn giải cơ chế phân tán năng lượng thay vì các chỉ tiêu định lượng độc lập.

Tựu trung, các phát hiện này củng cố quan điểm rằng năng lực chịu chấn là kết quả của bài toán tương tác phức hợp giữa phổ kích

động và đặc tính phi tuyến của công trình, mở ra tiền đề quan trọng để các nghiên cứu kế tiếp đi sâu định lượng hóa hàm lượng tần số động đất và đánh giá chỉ số hư hỏng trên đa dạng cấu hình kết cấu.

6. KẾT LUẬN

Thông qua phân tích lịch sử thời gian phi tuyến (NTHA) trên mô hình phần tử hữu hạn dầm-cột có xét đến sự hình thành khớp dẻo và hiệu ứng phi tuyến (hình học, vật liệu), nghiên cứu đã đánh giá toàn diện đáp ứng động đất của hai khung thép. Quá trình giải hệ phương trình động lực học được thực hiện bằng phương pháp Newmark kết hợp thuật toán Newton-Raphson dưới kích động của bảy băng gia tốc thực, được chuẩn hóa về mức đỉnh gia tốc nền mục tiêu PGA = 0,378g nhằm phù hợp với điều kiện địa chấn tại Việt Nam. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, dù được đưa về cùng một mức PGA, đáp ứng cơ học của kết cấu vẫn có sự phân tán lớn, minh chứng rõ ràng rằng PGA không phải là tham số duy nhất quyết định ứng xử động đất. Cụ thể, trên cấu hình khung không gian sáu tầng, trận động đất Kocaeli gây ra biến dạng bất lợi nhất với chuyển vị ngang tuyệt đối đạt 215,123 mm và chuyển vị lệch tầng lớn nhất lên tới 56,040 mm. Ngược lại, chuỗi kích động từ Loma Prieta lại tạo ra đáp ứng chuyển vị ngang êm dịu nhất (53,351 mm). Sự chênh lệch biên độ đáng kể giữa các kịch bản này nhấn mạnh sự cần thiết của việc kiểm soát đồng thời cả chuyển vị ngang tuyệt đối và chuyển vị lệch tầng.Từ những phát hiện này, các hướng nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng khảo sát trên đa dạng phổ phản ứng của nền đất và nhiều cấp độ gia tốc nền khác nhau. Bên cạnh đó, việc đi sâu đánh giá cơ chế phân bố khớp dẻo và định lượng các chỉ số hư hỏng của cấu kiện sẽ góp phần hoàn thiện bức tranh tổng thể về năng lực chịu chấn của hệ kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Li N, Zhu B, Zhang L, Kishiki S. Damage analysis of a pseudodassic reinforced concrete frame structure under the action of the Ms 6.8 Luding earthquake in China. Structures, vol. 60, article 105887, 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.105887. Internet: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105887 (accessed: 9/2026).

[2] Du YN, Feng DC, Wu G. InSAR-based rapid damage assessment of urban building portfolios following the 2023 Turkey earthquake. International Journal of Disaster Risk Reduction, vol. 103, article 104317, 2024, doi: 10.1016/j.ijdrr.2024.104317. Internet: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104317 (accessed: 9/2026).

[3] Lai X, He Z, Wu Y. Elastic inter-story drift seismic demand estimate of super high-rise buildings using coupled flexural-shear model with mass and stiffness non-uniformities. Engineering Structures, vol. 226, article 111378, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111378. Internet: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111378 (accessed: 9/2026).

[4] Nguyen HH, Truong VH. Machine Learning-based prediction of seismic lateral deflection of steel trusses using nonlinear time-history analysis. Structures, vol. 69, article 107369, 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.107369. Internet: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107369 (accessed: 9/2026).

[5] Truong VH, Kim SE. A robust method for optimization of semi-rigid steel frames subject to seismic loading. Journal of Constructional Steel Research, vol. 145, pp. 184-195, 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.02.025. Internet: https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.025 (accessed: 9/2026).

[6] Newmark NM. A method of computation for structural dynamics. Journal of the Engineering Mechanics Division, vol. 85, no. 3, pp. 67-94, 1959, doi: 10.1061/JMCEA3.0000098. Internet: https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000098 (accessed: 9/2026).

[7] Nguyen HD, Dao ND, Shin M. Prediction of seismic drift responses of planar steel moment frames using artificial neural network and extreme gradient boosting. Engineering Structures, vol. 242, article 112518, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112518. Internet: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112518 (accessed: 9/2026).

[8] Vu QA, Cao TS, Nguyen HH, Truong VH, Ha MH. An efficient differential evolution-based method for optimization of steel frame structures using direct analysis. Structures, vol. 51, pp. 67-78, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.03.020. Internet: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.020 (accessed: 9/2026).

[9] Truong VH, Tangaramvong S, Nguyen MC, Pham HA. Machine learning-based safety assessment of steel frames under seismic loadings using nonlinear time-history analysis. Steel and Composite Structures, vol. 54, no. 4, pp. 295-312, 2025, doi: 10.12989/scs.2025.54.4.295. Internet: https://doi.org/10.12989/scs.2025.54.4.295 (accessed: 8/2026).

[10] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P695). Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2009. Internet: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema_p695_quantification_of_building_seismic_performance_factors.pdf (accessed: 8/2026).

[11] Bộ Xây dựng. Thông tư số 02/2022/TT-BXD ban hành QCVN 02:2022/BXD: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, 2022. Internet: https://chinhphu.vn/?dassid=1&docid=206690&pageid=27160&typegroupid=6 (accessed: 8/2026).

[12] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9386-1:2025: Thiết kế kết cấu chịu động đất - Phần 1: Quy định chung, tác động động đất và quy định cho nhà, 2025. Internet: https://tieuchuan.vsqi.gov.vn/tieuchuan/view?sohieu=TCVN+9386-1%3A2025 (truy cập: tháng 9/2026).

[13] Chen WF, Lui EM. Structural Stability: Theory and Implementation. Elsevier, New York, 1987. Internet: https://search.worldcat.org/title/Structural-stability-%3A-theory-and-implementation/oclc/14212558 (accessed: 8/2026).

[14] Chen WF, Lui EM. Stability Design of Steel Frames. CRC Press, Boca Raton, FL, 1992.

[15] Kim SE, Choi SH. Practical advanced analysis for semi-rigid space frames. International Journal of Solids and Structures, vol. 38, no. 50-51, pp. 9111-9131, 2001, doi: 10.1016/S0020-7683(01)00141-X. Internet: https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00141-X (accessed: 8/2026).

[16] Orbison JG, McGuire W, Abel JF. Yield surface applications in nonlinear steel frame analysis. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 33, no. 1-3, pp. 557-573, 1982, doi: 10.1016/0045-7825(82)90122-0. Internet: https://doi.org/10.1016/0045-7825(82)90122-0 (accessed: 12/11/2026).

[17] Kim SE, Choi SH. Practical second-order inelastic analysis for three-dimensional steel frames subjected to distributed load. Thin-Walled Structures, vol. 43, no. 1, pp. 135-160, 2005, doi: 10.1016/j.tws.2004.09.001. Internet: https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.09.001 (accessed: 12/11/2026).

[18] Kim SE, Uang CM, Choi SH, An KY. Practical advanced analysis of steel frames considering lateral-torsional buckling. Thin-Walled Structures, vol. 44, no. 7, pp. 709-720, 2006, doi: 10.1016/j.tws.2006.08.004. Internet: https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.08.004 (accessed: 12/11/2026).

[19] American Institute of Steel Construction (AISC). Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design. Chicago, IL, 1999.

[20] Yang YB, Shieh MS. Solution method for nonlinear problems with multiple critical points. AIAA Journal, vol. 28, no. 12, pp. 2110-2116, 1990, doi: 10.2514/3.10529. Internet: https://doi.org/10.2514/3.10529 (accessed: 8/2026).

[21] Truong VH, Kim SE. An efficient method for reliability-based design optimization of nonlinear inelastic steel space frames. Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 56, pp. 331-351, 2017, doi: 10.1007/s00158-017-1667-7. Internet: https://doi.org/10.1007/s00158-017-1667-7 (accessed: 8/2026).

[22] Nguyen HP, Pham TT. Probabilistic seismic hazard assessment for the South Central Vietnam. Vietnam Journal of Earth Sciences, vol. 36, pp. 451-461, 2014, doi: 10.15625/0866-7187/36/4/6433. Internet: https://doi.org/10.15625/0866-7187/36/4/6433 (accessed: 8/2026).

[23] Bùi Công Quế và cộng sự. Nguy hiểm động đất và sóng thần ở vùng ven biển Việt Nam. NXB. Khoa học tự nhiên và Công nghệ, 2010.

[24] Nguyễn Hồng Hải. Nghiên cứu ứng xử của kết cấu nhà cao tầng dưới tác dụng của động đất tại Việt Nam. Luận án Tiến sĩ, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), 2015.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Mô phỏng ảnh hưởng của hình dáng kích thước mẫu và hàm lượng cát nghiền thay thế cát tự nhiên đến cường độ chịu nén của bê tông bằng mô hình MSEL mở rộng

Modelling the effects of specimen size/shape and replacement ratio of crushed limestone sand for natural sand and on the compressive strength of normal concrete by Extended MSEL model

> ĐỖ TRỌNG THÀNH[1,2], TỐNG TÔN KIÊN[1], LÊ VIỆT DŨNG[1,*]
[1]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[2]Văn phòng Ủy ban nhân dân TP Hải Phòng
[*]Email: dunglv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp mở rộng mô hình Modified Size Effect Law (MSEL) nhằm phân tích ảnh hưởng của tỷ lệ cát nghiền (CN) thay thế cát tự nhiên (CTN) và kích thước hình học mẫu đến cường độ nén của bê tông. Bê tông cấp bền B20 được thiết kế với các tỷ lệ CN thay thế CTN lần lượt là 0%, 50%, 75%,100%. Cường độ chịu nén được xác định trên mẫu lập phương (150 × 150 × 150 mm), mẫu trụ (150 × 300 mm) và lăng trụ (150 × 150 × 600 mm). Kết quả thực nghiệm cho thấy tỷ lệ CN thay thế CTN và hình học mẫu đều ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của bê tông. Việc sử dụng CN có thể góp phần cải thiện cường độ nhờ hiệu ứng lấp đầy và tăng độ đặc chắc của cấu trúc vật liệu; tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng cần được xem xét theo từng tỷ lệ thay thế và dạng mẫu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất mở rộng MSEL bằng cách bổ sung tham số riêng đại diện cho tỷ lệ CN thay thế CTN, bên cạnh các tham số mô tả ảnh hưởng của hình học mẫu. Phương pháp xác định tham số được xây dựng theo hướng tách biệt nhóm tham số đặc trưng cho vật liệu và nhóm tham số đặc trưng cho hình dáng, kích thước mẫu. Mô hình đề xuất được đánh giá thông qua mức độ phù hợp với kết quả thực nghiệm. Nghiên cứu góp phần cung cấp một phương pháp mô hình hóa ảnh hưởng kết hợp của thành phần cốt liệu mịn và hình học mẫu đến cường độ chịu nén của bê tông sử dụng CN.

Từ khóa: Cát nghiền từ đá vôi; cát tự nhiên; cường độ chịu nén; hiệu ứng kích thước/hình học mẫu; mô hình MSEL.

ABSTRACT

This study proposes an extension of the Modified Size Effect Law (MSEL) to analyze the combined effects of the crushed sand (CS) replacement ratio for natural sand (NS) and specimen size/shape on the compressive strength of concrete. Grade B20 concrete mixtures were prepared with CS replacement ratios of 0%, 50%, 75%, and 100%. Compressive strength was determined using three specimen geometries: cubes (150 × 150 × 150 mm), cylinders (150 × 300 mm), and prisms (150 × 150 × 600 mm), at 28 days. The experimental results show that both the CS replacement ratio and specimen size/shape affect the compressive strength of concrete. The incorporation of CS may improve compressive strength through the filler effect and enhanced particle packing; however, the magnitude of this effect should be considered in relation to the replacement ratio and specimen geometry. Based on the experimental results, an extended MSEL model is proposed by introducing an additional parameter specifically representing the CS replacement ratio, alongside the parameters describing specimen geometry. The parameter identification procedure is formulated to distinguish material-related parameters from those associated with specimen shape and size. The model is evaluated by assessing its agreement with the experimental results. This study provides a modeling approach for analyzing the combined effects of fine aggregate composition and specimen geometry on the compressive strength of concrete incorporating CS.

Keywords: Crushed limestone sand; natural sand; compressive strength; specimen size/shape effect; MSEL model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

CN, đặc biệt là cát nghiền từ đá vôi, đang được sử dụng ngày càng phổ biến nhằm thay thế một phần hoặc toàn bộ CTN trong sản xuất bê tông. Xu hướng này xuất phát từ nhu cầu bảo đảm nguồn cung cốt liệu mịn, hạn chế khai thác cát sông và hướng tới sử dụng hiệu quả tài nguyên khoáng sản [1 - 3]. Tuy nhiên, do có hình dạng hạt góc cạnh, bề mặt nhám và thành phần hạt mịn khác biệt so với CTN, việc sử dụng CN có thể làm thay đổi cấu trúc hạt, đặc trưng liên kết giữa hồ xi măng và cốt liệu, từ đó ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của bê tông [4 - 8]. Các nghiên cứu đã công bố cho thấy CN và các loại cốt liệu mịn nghiền có thể cải thiện cường độ chịu nén nhờ hiệu ứng lấp đầy và tăng độ đặc chắc của vật liệu. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào tỷ lệ thay thế, thành phần cấp phối và đặc điểm của vật liệu sử dụng [5 - 10].

Bên cạnh ảnh hưởng của thành phần vật liệu, cường độ chịu nén xác định bằng thực nghiệm còn phụ thuộc vào hình dáng và kích thước mẫu. Các mẫu lập phương, mẫu trụ và mẫu lăng trụ có trạng thái ứng suất, mức độ kiềm chế biến dạng và điều kiện phát triển vết nứt khác nhau khi chịu nén, dẫn đến sự khác biệt về cường độ đo được [11 - 13]. Hiệu ứng kích thước mẫu đã được nghiên cứu qua nhiều mô hình lý thuyết và thực nghiệm. Trong đó, Size Effect Law (SEL) do Bazant đề xuất là một trong những cơ sở lý thuyết quan trọng để mô tả sự phụ thuộc của cường độ vật liệu vào kích thước kết cấu hoặc mẫu thử [14]. Các nghiên cứu tiếp theo đã phát triển và ứng dụng các cách tiếp cận dựa trên hiệu ứng kích thước để phân tích cường độ chịu nén của bê tông [15 - 18]. Bên cạnh đó, ảnh hưởng riêng của hình dáng, kích thước và phương đặt mẫu đến cường độ chịu nén cũng đã được khảo sát bằng thực nghiệm [11, 13]. Tuy nhiên, ảnh hưởng đồng thời của sự thay đổi thành phần vật liệu, cụ thể là tỷ lệ CN thay thế CTN, với hình dáng và kích thước mẫu vẫn cần được xem xét trong một mô hình thống nhất.

Từ thực tế trên, cần phát triển mô hình số có khả năng mô tả đồng thời ảnh hưởng của tỷ lệ CN thay thế CTN và hình dáng, kích thước mẫu đến cường độ chịu nén của bê tông. Đặc biệt, việc xác định các tham số mô hình cần phân biệt được ảnh hưởng của đặc trưng vật liệu với ảnh hưởng của hình học mẫu, qua đó làm rõ vai trò riêng của từng yếu tố và hạn chế sự phụ thuộc lẫn nhau khi hiệu chỉnh mô hình. Đây là cơ sở để xây dựng mô hình có khả năng dự báo cường độ chịu nén đối với các tỷ lệ CN và dạng mẫu khác nhau. Bài báo đề xuất mô hình số phát triển từ MSEL, trong đó các tham số ảnh hưởng của tỷ lệ CN thay thế CTN và các tham số đặc trưng cho hình dáng, kích thước mẫu được xác định theo hướng tách biệt.

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước mẫu đến cường độ nén mẫu bước đầu đã được Tanigawa (1978) [15] và Bazant trao đổi nghiên cứu trên các mẫu trụ tỉ lệ kích thước *D/H* = 1/2 với các phân tích khi cho đường kính *D* thay đổi, có kể đến ảnh hưởng của kích thước cốt liệu trung bình *d*:

$$f_c/f_{c0} = \frac{a-b\left\{\log\left(\frac{D}{d}\right)\right\}^{-c}}{a-b\left\{\log\left(\frac{D_0}{d}\right)\right\}^{-c}}(V_0/V)^{1/(\beta+1)} \quad (1)$$

Trong đó: f_c, V, D (f_{co}, V_o, D_o) là cường độ nén, thể tích, đường kính của mẫu (và mẫu đối chứng). Các hệ số mô hình a, b, c, β được xác định bằng thực nghiệm.

Năm 1984, theo hướng nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước mẫu đến cường độ nén mẫu thông qua bài toán cân bằng năng lượng khi xét đến sự phát triển lan truyền chiều dài vết nứt a trong bê tông, Bazant [14] đề xuất mô hình SEL (Size Effect Law) có kể đến thông số kích thước cốt liệu d_a và cường độ kéo f_t' của bê tông:

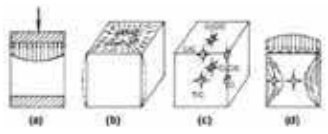
$$\sigma_N = \left\{Bf_t' / [1 + (d/f(a/d)d_a)]^{1/2}\right\} \quad (2)$$

Trong đó: σ_N cường độ nén, thông số B, d lần lượt là hệ số thực nghiệm và kích thước đặc trưng của mẫu. Mô hình số theo công thức (2) của Bazant trên thực tế được nhiều nghiên cứu sau đó phát triển với mô hình điều chỉnh MSEL (Modified Size Effect Law) để đánh giá phân tích ảnh hưởng của tỉ lệ kích thước mẫu thay đổi đến cường độ nén đặc trưng của bê tông [11], [16 - 19]. Mô hình MSEL theo đó được nhóm nghiên cứu sử dụng làm cơ sở cho xây dựng mô hình số trong bài báo này.

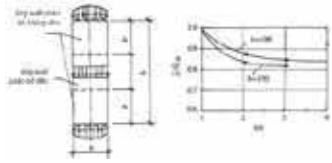
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình phân tích ảnh hưởng kích thước mẫu đến cường độ nén bê tông

Trong hệ thống tiêu chuẩn trên thế giới, việc nghiên cứu ảnh hưởng kích thước mẫu là cơ sở nền tảng để xác định hệ số chuyển đổi từ cường độ nén đặc trưng f_{ck} /$f_{ck,cub}$ sang cường độ tính toán f_{cd}. Cơ sở của việc lựa chọn hình dáng và kích thước mẫu phù hợp để xác định giá trị cường độ tính toán được thể hiện trên Hình 1 và Hình 2 theo phân tích của Zhenhai [19].



Hình 1. Trạng thái ứng suất và phá hoại nén mẫu



Hình 2. Phân tích phân bố ứng suất nén mẫu

Sự phân bố ứng suất của bê tông dọc theo chiều cao của mẫu và cấu kiện thí nghiệm là không đồng đều. Càng ở sát hai mép của mẫu thí nghiệm, do ảnh hưởng của ứng suất cục bộ và cản trở biến dạng do ma sát ở mặt tiếp xúc bê tông với bàn nén (Hình 1). Do đó, để hạn chế sự ảnh hưởng này, các nghiên cứu thực nghiệm khác nhau đã được tiến hành trên mẫu trụ, mẫu lăng trụ với tỉ lệ thay đổi h/b = 1/2 đến 1/4. Theo đó tỉ lệ 1/4 cho phép phân tích trạng thái phá hoại do nén thuần túy của bê tông (Hình 2).

Trên thực tế, thông số chiều dài nứt a của mô hình SEL rất khó xác định trong nghiên cứu thực nghiệm, nhất là khi tính chất bê tông thay đổi. Để đơn giản công thức, một số nghiên cứu của Kim (1989, 1990) [16, 17] và Bazant (1993, 1997) [11,18] đã đề xuất mô hình SEL điều chỉnh (MSEL - modified SEL), theo công thức sau:

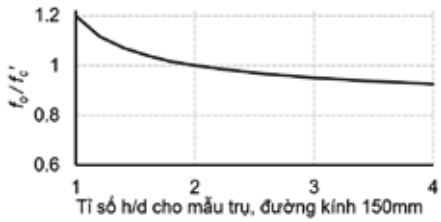
$$\sigma_N = \left\{Bf_t' / [1 + (d/\lambda_0 d_a)]^{1/2}\right\} + \alpha f_t' \quad (3)$$

Phát triển trên mô hình MSEL, Kim và Seong (2002) [18] đã xây dựng mô hình mô phỏng ảnh hưởng kích thước mẫu đến cường độ nén mẫu bê tông lăng trụ. Đồng thời, nhằm phân tích đánh giá ảnh hưởng của h/d với các tỉ lệ khác nhau, Kim và cộng sự đề xuất công thức điều chỉnh (4):

$$f_0 = \left\{Bf_c' / [1 + (d/\lambda_1(f_c')d_a^m)(h/d - \beta)]^{1/2}\right\} + \alpha(f_c')f_c' \quad (4)$$

Trong đó f_0 là cường độ nén mẫu lăng trụ, với đường kính mẫu *d*. Căn cứ trên số liệu thống kê tham khảo được từ 222 và 456 mẫu thí nghiệm cho các trường hợp h/d = 2 và ≠ 2 của nhiều tác giả khác nhau, kết quả phân tích của Kim và cộng sự [18] cho thấy có thể bỏ qua mức độ ảnh hưởng của cường độ nén và kích thước hạt cốt liệu. Đây là cơ sở cho phép đơn giản hóa, Kim và cộng sự đã đơn giản được thu gọn lại như công thức (5):

$$f_0 = 0.4f_c' / [1 + (h - d)/50]^{\frac{1}{2}} + 0.8f_c' \quad (5)$$



Hình 3. Ảnh hưởng kích thước mẫu đến cường độ nén của bê tông

Kết quả phân tích mô hình (5) trên Hình 3 khi lấy giá trị cường độ mẫu trụ tỉ lệ 2/1 làm quy chiếu, kết quả khảo sát cho thấy mô hình (5) của Kim và cộng sự phù hợp với phân tích của Zhenhai [19]. Ngoài ra giá trị mô hình cho thấy cường độ nén mẫu trụ đường kính 15 cm, có tỉ lệ h/d=1/1 cho giá trị tương đồng cường độ nén mẫu lập phương cạnh 15 cm. Do đó bài báo này đã phát triển mô hình số căn cứ theo mô hình MSEL điều chỉnh này, sử dụng cường độ nén mẫu lập phương làm cơ sở quy đổi.

Thành và cộng sự [10] nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng CN thay thế CTN đến cường độ chịu nén của bê tông, cho thấy sự ảnh hưởng rõ nét của cả hai thông số trên đến kết quả đo. Theo như cơ chế được phân tích rõ nét từ các nghiên cứu thực nghiệm của nhiều tác giả như đã đề cập ở mục 1, để đơn giản hóa, mô hình số nhóm nghiên cứu đề xuất đã xây dựng theo giả thiết tách biệt hai yếu tố này. Cụ thể:

- Ảnh hưởng của CN: hệ số ảnh hưởng hàm lượng CN *(r_{cn})* sẽ được sử dụng thay cho hệ số *$\alpha(f_c')$* trong công thức (4) mà Kim và cộng sự đã đơn giản hóa bỏ qua như công thức (5).

- Ảnh hưởng của kích thước mẫu: cường độ nén R_{cub} mẫu lập phương 15x15x15 cm được sử dụng làm giá trị quy đổi.

Mô hình số đề xuất đề được biểu diễn theo công thức mở rộng dưới đây:

$$R = \zeta.\frac{R_{cub}}{\left[1+\alpha.d.\left(\frac{h}{d}-1\right)\right]^{\frac{1}{2}}} + (1-\zeta).(1-a.r_{cn}^2+b.r_{cn})R_{cub} \quad (6)$$

Trong đó: α, ζ, a, b : thông số mô hình đánh giá mức độ ảnh hưởng của hai yếu tố kích thước mẫu *h/d* và hàm lượng cát nghiền thay thế cát tự nhiên r_{cn}.

2.2. Vật liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, 2 loại cát gồm cát vàng tự nhiên và cát nhân tạo nghiền từ đá vôi Hà Nam được sử dụng, với các tỷ lệ CN thay thế CTN lần lượt là 0%, 50%, 75% và 100%. Các vật liệu được đánh giá kiểm tra tính chất cơ bản theo TCVN 7570:2006 và TCVN 9205:2012. Cốt liệu lớn sử dụng trong nghiên cứu là đá dăm tự nhiên có D_{max}=20 mm. Xi măng sử dụng PCB40 Vicem Bút Sơn. Nước sử dụng trong nghiên cứu là nước sinh hoạt. Các tính chất cơ bản của vật liệu và thành phần cấp phối bê tông được nêu chi tiết trong công trình công bố trước của tác giả [10].

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Để đánh giá sự ảnh hưởng của hàm lượng CN thay thế CTN đến tính chất hỗn hợp bê tông bằng mô hình số, nghiên cứu tập trung đánh giá cường độ nén và sự phát triển cường độ nén được xác định trên các tổ mẫu lập phương 150×150×150 mm, mẫu trụ có Dxh=150×300 mm, mẫu lăng trụ 150×150×600 mm ở các tuổi bảo dưỡng 7, 14, 28 ngày. Quy trình thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 3118:2022. Số liệu thực nghiệm đo được cho phép xác định các thông số của mô hình số thiết lập theo công thức (6).

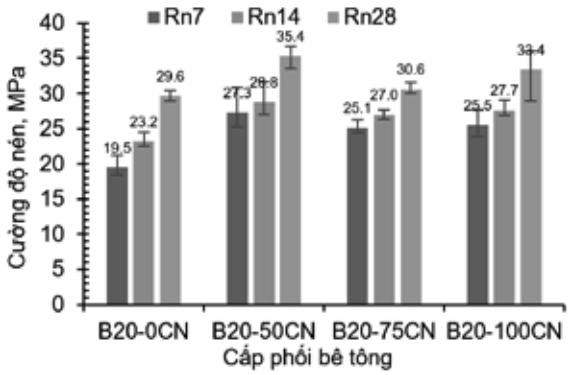
3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác định thông số mô hình đánh giá ảnh hưởng của hàm lương CN thay thế CTN

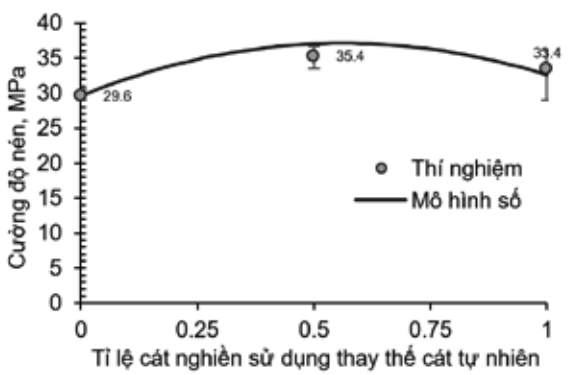
Mô hình số đề xuất của nhóm nghiên cứu được xây dựng dựa trên giả thiết tách biệt giữa hai thông số ảnh hưởng của hình dáng kích thước mẫu và tỉ lệ cát nghiền thay thế cát tự nhiên. Theo đó để nghiên cứu ảnh hưởng của cát nghiền lên cường độ nén mẫu lập phương được được sử dụng, với giá trị h/d = 1, *ζ= 0*, mô hình số đề xuất (6) được rút gọn theo công thức (7):

$$R = (1-a.r_{cn}^2+b.r_{cn})R_{cub} \quad (7)$$

Căn cứ trên số liệu kết quả thí nghiệm đã đăng [16], bài báo bổ sung thêm kết quả thí nghiệm nén với tỉ lệ CN thay thế 75%. Số liệu đo được biểu diễn trong Hình 4.



Hình 4. Ảnh hưởng của CN đến cường độ nén bê tông B20 trên mẫu lập phương 15 cm



Hình 5. Xác định thông số ảnh hưởng hàm lượng CN đến cường độ nén mẫu (28 ngày tuổi, B20)

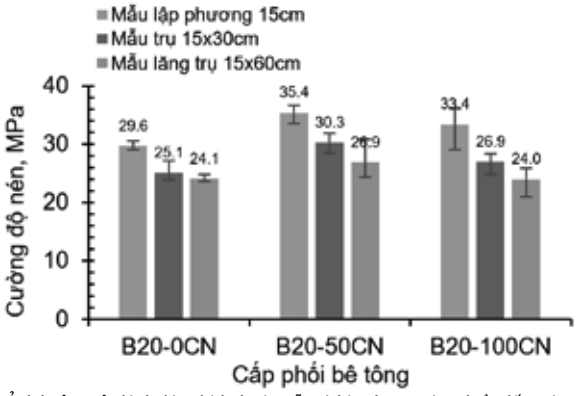
Đối với mẫu lập phương (Hình 4), so với cấp phối đối chứng sử dụng 100% CTN (B20-0CN), việc thay thế 50%, 75% và 100% cát tự nhiên bằng CN làm cường độ tăng tương ứng 19,6% và 12,8%. Đáng chú ý, hiệu quả tăng cường độ đạt giá trị lớn hơn ở tuổi sớm tại 7 ngày, cường độ của B20-50CN và B20-100CN cao hơn B20 lần lượt 40,0%, 30,8%; đến 14 ngày, các mức tăng tương ứng giảm xuống 24,1%, 19,4%. Xu hướng này cho thấy ảnh hưởng của CN đến cường độ không chỉ liên quan đến cường độ cuối cùng mà còn liên quan đến động học quá trình rắn chắc và phát triển cường độ của bê tông [20].

Một kết quả đáng chú ý khác là việc thay thế 100% CTN không tiếp tục làm tăng cường độ so với tỷ lệ thay thế 50%. Điều này cho thấy ảnh hưởng của CN không có quan hệ tuyến tính với tỷ lệ thay thế. Khi tăng hàm lượng CN cao, lợi ích do cải thiện khả năng lèn chặt và lực chèn móc có thể bị bù trừ bởi sự gia tăng diện tích bề mặt riêng, nội ma sát và lượng hồ xi măng yêu cầu để bao phủ hạt cốt liệu. Với cùng hàm lượng hồ xi măng và nước trong B20, việc sử dụng 100% CN có thể làm giảm khả năng duy trì cấu trúc đồng nhất của hỗn hợp, đặc biệt khi hàm lượng hạt góc cạnh và hạt mịn tăng. Sự gia tăng độ phân tán của kết quả cũng ủng hộ nhận định này. Do đó, trong phạm vi cấp phối nghiên cứu, tỷ lệ thay thế khoảng 50% có thể được xem là vùng có hiệu quả tốt nhất.

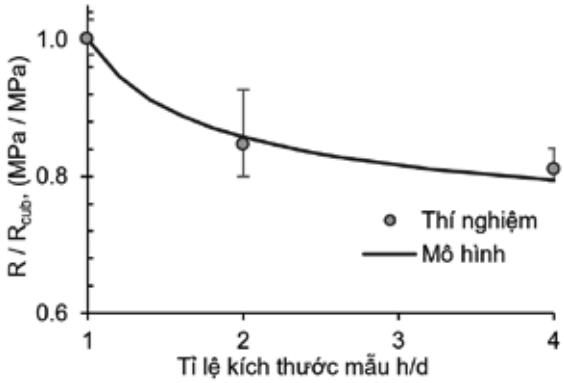
Các quan sát từ phân tích kết quả thực nghiệm nêu trên cho thấy, việc sử dụng mô hình bậc 2 theo công thức (8) khi xét ảnh hưởng của hàm lượng cát nghiền (rcn) đến cường độ chịu nén bê tông là hợp lý để mô phỏng tỉ lệ thay thế hiệu quả ở khoảng 50%. Căn cứ trên hệ thống số liệu thực nghiệm, giá trị các thông số mô hình xác định được lần lượt a=0,8, b=0,9. Kết quả so sánh thể hiện trên Hình 5.

3.2. Xác định thông số mô hình đánh giá ảnh hưởng của hình dáng kích thước mẫu

Sự ảnh hưởng hình dạng kích thước mẫu đến cường độ nén bê tông được quan sát rõ qua kết quả thực nghiệm thể hiện trong Hình 6, khi so sánh kết quả nén các mẫu lập phương, mẫu trụ và mẫu lăng trụ ở các tuổi 28 ngày tuổi.



Hình 6. Ảnh hưởng của hình dáng kích thước mẫu và hàm lượng cát nghiền đến cường độ nén bê tông B20



Hình 7. Mô phỏng suy giảm cường độ nén mẫu bê tông khi thay đổi tăng tỉ lệ h/d mẫu bê tông B20, sử dụng 100% cát tự nhiên

Kết quả quan sát trên Hình 6 cho thấy khi thay đổi hình dáng kích thước mẫu, sự suy giảm cường độ nén mẫu với các tỉ lệ thay thế cát nghiền khác nhau cho tốc độ suy giảm khác nhau. Sự suy giảm khác biệt này cho thấy cường độ nén mẫu không chỉ phụ thuộc nội tại của vật liệu do cát nghiền mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể của điều kiện biên và hình dạng mẫu. Về cơ chế, mẫu lập phương 15x15x15cm có tỷ số chiều cao/kích thước ngang bằng 1/1, do đó ma sát giữa hai đầu mẫu và bàn ép làm hạn chế đáng kể biến dạng nở ngang của bê tông, phù hợp với nhận định của [21].

Đối với mẫu trụ dxh=150×300 mm có tỷ số h/d bằng 2/1, ảnh hưởng của ma sát và hiệu ứng bó ở hai đầu giảm so với mẫu lập phương, do đó cường độ đo được phản ánh gần hơn trạng thái chịu nén một trục của vật liệu [22]. Bên cạnh đó, do bản thân trong hạt CN có thể tồn tại các khuyết tật nứt trong hạt khi gia công nghiền đập nên cường độ nén của hạt yếu cũng dẫn đến cường độ bê tông thu được thấp và độ phân tán của kết quả mẫu lăng trụ có xu hướng tăng cao hơn khi sử dụng CN, đặc biệt đối với B20-100CN.

Với giả thiết tách biệt sự tương tác giữa hai yếu tố tỉ lệ mẫu và tỉ lệ thay thế CN khi xây dựng mô hình số, các thông số mô hình đánh giá ảnh hưởng hình dáng kích thước mẫu đến cường độ nén bê tông theo đó được phân tích với bê tông B20-0CN, tương ứng $r_{cn} = 0$. Khi đó mô hình số đề xuất (6) được rút gọn theo (8).

$$R = \zeta.\frac{R_{cub}}{\left[1+\alpha.d.\left(\frac{h}{d}-1\right)\right]^{\frac{1}{2}}} + (1-\zeta).R_{cub} \quad (8)$$

Căn cứ theo kết quả thí nghiệm trong Hình 6, số liệu thí nghiệm cho cấp phối B20, sử dụng 100% cát nghiền được sử dụng để xác định thông số mô hình đề xuất, α , ζ. Kết quả so sánh trên Hình 7 cho giá trị lần lượt $\alpha = 0{,}015$, $\zeta = 0{,}32$.

3.3. Thảo luận khả năng áp dụng mô hình số đề xuất

Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm tiến hành cho thấy khi tăng tỷ lệ CN từ 0 lên 50%, hiệu ứng vật liệu của CN thông qua hình dạng góc cạnh, bề mặt nhám và khả năng chèn móc cơ học có xu hướng làm tăng khả năng truyền ứng suất và cường độ nén. Khi tăng tiếp lên 100%, sự gia tăng diện tích bề mặt và nội ma sát có thể làm giảm hoặc triệt tiêu lợi ích của sự lèn chặt làm giảm dần sự truyền ứng suất và cường độ nén mẫu. Đồng thời, khi tỷ số hình học của mẫu tăng từ 1/1 lên 2/1 và 4/1, ảnh hưởng của hiệu ứng bó giảm, làm cho mức tăng cường độ biểu kiến do CN giảm dần. Do đó, cường độ nén đo được của bê tông sử dụng CN cần được xem là kết quả tổng hợp của đặc tính vật liệu và điều kiện biên của phép thử.

Việc sử dụng kết quả thí nghiệm theo quy trình trình bày trên các mục 3.1 và 3.2 để xác định các thông số mô hình của mô hình số đề xuất cho thấy sự phù hợp của mô hình đề xuất trong nghiên cứu bê tông cấp độ bền B20. Thông số mô hình xác định được cho giá trị lần lượt $\alpha = 0{,}015$, $\zeta = 0{,}32$ và a = 0,8, b = 0,9. Kết quả phân tích mô hình được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh kết quả thí nghiệm với mô hình số đề xuất, bê tông B20 với các mức thay thế cát nghiền 0%, 50%, 100%

Tỉ lệ	Cấp phối B20-0CN			Cấp phối B20-50CN			Cấp phối B20-100CN		
h/d	Mô hình	Thí nghiệm	Sai số	Mô hình	Thí nghiệm	Sai số	Mô hình	Thí nghiệm	Sai số
1/1	29,6	29,6	0%	34,7	35,4	-2,1%	31,6	33,4	-5,2%
2/1	25,4	25,1	1,2%	30,4	30,3	0,5%	27,4	26,9	2,0%
4/1	23,6	24,1	-2,3%	28,6	26,9	6,3%	25,6	23,9	6,9%

Kết quả so sánh giữa mô hình và thực nghiệm trong Bảng 3 khi thay đổi tỉ lệ CN cho thấy, kết quả mô hình tương đồng với kết quả thực nghiệm với mẫu tỉ lệ h/d = 1/1, 2/1. Ở tỉ lệ kích thước mẫu h/d = 4/1, sai số giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm tăng nhẹ, -2,3%, 6,3% và 6,9% tương ứng tỉ lệ CN thay thế 0%, 50% và 100%. Tương quan so sánh sai số giữa mô hình và nghiên cứu thực nghiệm cho thấy mô hình số đề xuất cho kết quả phân tích hợp lý cho phép đánh giá ảnh hưởng của CN và kích thước mẫu đến cường độ chịu nén của bê tông nghiên cứu B20. Kết quả phân tích mô hình và thực nghiệm trên mẫu lập phương và mẫu trụ cho thấy CN thay thế CTN cho phép cải thiện nâng cao cường độ nén mẫu của bê tông. Tuy nhiên ở kích thước mẫu h/d=4/1, mô hình số đề xuất vẫn còn hạn chế khi chưa đánh giá được chính xác mức độ suy giảm cường độ thực tế đo theo kết quả thí nghiệm phân tích với B20-100CN.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên sự so sánh giữa kết quả mô phỏng bằng mô hình số và nghiên cứu thực nghiệm, khi thí nghiệm nén B20 ở các mẫu có kích thước và hàm lượng cát nghiền khác nhau, kết quả nghiên cứu đạt được một số kết luận sau:

✓ Ảnh hưởng của cát nghiền đến cường độ nén của bê tông B20 ở các mẫu thí nghiệm có tỉ lệ kích thước mẫu h/d thay đổi cho mức độ ảnh hưởng là khác nhau. Mô hình số đề xuất của nhóm nghiên cứu cho phép đánh giá định lượng mức độ ảnh hưởng này.

✓ Mô hình đề xuất được xây dựng mở rộng từ mô hình MSEL, với giả thiết tách biệt sự ảnh hưởng đến cường độ nén mẫu của hai cơ chế liên quan hình dáng kích thước mẫu và tỉ lệ CN thay thế CTN, cho phép thiết lập quy trình đơn giản xác định thông số mô hình. Kết quả mô phỏng bằng mô hình số đề xuất đánh giá khá chính xác với kết quả nghiên cứu thực nghiệm, cho sai số < 7%.

Nghiên cứu cho thấy sự khác biệt kết quả phân tích giữa mô hình số và thực nghiệm ngày càng rõ ràng khi hàm lượng CN và kích thước mẫu thí nghiệm tăng. Do đó mô hình cần được đánh giá kiểm chứng trên các thí nghiệm kích thước cấu kiện phù hợp để đánh giá khả năng áp dụng mô hình số này trong phân tích kết cấu BTCT khi sử dụng cát nghiền thay cát tự nhiên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phạm Văn Bắc. Cát nghiền và khoáng sản thay thế cát tự nhiên: Tình hình đầu tư sản xuất, sử dụng cát nghiền, cơ chế chính sách phát triển và khuyến khích sử dụng cát nghiền và tro xỉ nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng. Tuyển tập báo cáo Hội thảo KHCN toàn quốc "Cát nghiền thay thế cát tự nhiên: Vật liệu thân thiện môi trường", NXB. Xây dựng, tr. 13-20, 2018.

[2] Bạch Đình Thiên, Tống Tôn Kiên và Cao Thị Hương. Vật liệu thay thế cát tự nhiên và sử dụng tro xỉ nhà máy nhiệt điện trong sản xuất vật liệu xây dựng. Tuyển tập báo cáo Hội thảo KHCN toàn quốc "Cát nghiền thay thế cát tự nhiên: Vật liệu thân thiện môi trường", NXB. Xây dựng, tr. 36-55, 2018.

[3] Chính phủ. Quyết định số 1266/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021 - 2030, định hướng đến năm 2050, 2020.

[4] Ziyang Li, Junying Lao, Lijie Wang, Namyo Salim Lim, Kang Hai Tan and Shunzhi Qian. A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. Construction and Building Materials, vol. 346, Art. 128417, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128417.

[5] B. Menadi, S. Kenai, J. Khatib and A. Ait-Mokhtar. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. Construction and Building Materials, vol. 23, no. 2, pp. 625-633, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.005.

[6] H. Donza, O. Cabrera and E.F. Irassar. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, vol. 32, no. 11, pp. 1755-1761, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00860-8.

[7] Buthainah Nawaf Al-Kharabshed, Mohamed M.A., Ali M., Jawwad A., Ahmed F.D., Hakamy A. and Hasan M.A. Feasibility study on concrete made with substitution of quarry dust: A review. Sustainability, vol. 14, no. 12, Art. 15304, 2022.

[8] T. Celik and K. Marar. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 26, no. 7, pp. 1121-1130, 1996, doi: 10.1016/0008-8846(96)00078-6.

[9] Nguyễn Văn Đoàn, Phan Văn Quỳnh và Dương Thanh Qui. Ảnh hưởng của cát nghiền đến một số tính chất của bê tông. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, vol. 15, no. 6, tr. 7-12, 2025, doi: 10.54772/jomc.06.2025.1130.

[10] Đ.T. Thành, T.T. Kiên và L.V. Dũng. Ảnh hưởng của cát nghiền từ đá vôi đến tổn thất độ sụt và cường độ chịu nén của bê tông xi măng chịu lực. Tạp chí Xây dựng, số 09, tr. 162-167, 2026.

[11] Zoltan Gyorko and Rita Nemes. Specimen size and shape effect on compressive strength of normal strength concrete. Periodica Polytechnica Civil Engineering, vol. 64, no. 1, pp. 276-286, 2020, doi: 10.3311/PPci.15338.

[12] Matthews Vargas Vaucher Bandeira, Kevin Rebolledo La Torre, Luis Eduardo Kosteski, Ederli Marangon and Jorge Daniel Riera. Influence of contact friction in compression tests of concrete samples. Construction and Building Materials, vol. 317, 125811, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125811.

[13] Seong-Tae Yi, Eun-Ik Yang and Joong-Cheol Choi. Effect of specimen sizes, specimen shapes and placement directions on compressive strength of concrete. Nuclear Engineering and Design, vol. 236, no. 2, pp. 115-127, 2006, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.08.004.

[14] Zdeněk P. Bažant. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. Journal of Engineering Mechanics, vol. 110, no. 4, pp. 518-535, 1984, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:4(518).

[15] Y. Tanigawa and K. Yamada. Size effect in compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 8, pp. 181-190, 1978, doi: 10.1016/0008-8846(78)90007-8.

[16] J.K. Kim, S.H. Eo and H.K. Park. Size effect in concrete specimens without initial crack. Fracture Mechanics: Application to Concrete, ACI SP-118, Detroit, pp. 179-196, 1989.

[17] J.K. Kim and S.H. Eo. Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks. Magazine of Concrete Research, vol. 42, no. 153, pp. 233-238, 1990, doi: 10.1680/macr.1990.42.153.233.

[18] Jin-Keun Kim and Seong-Tae Yi. Application of size effect to compressive strength of normal concrete members. Indian Academy of Sciences, vol. 7, part 4, pp. 467-484, 2002.

[19] Zhenhai Guo. Principles of Reinforced Concrete. Elsevier, 1st edition, 2014, ISBN: 978-0-12-800859-1.

[20] Japhet Tiegoum Wembe, Luc Leroy Mambou Ngueyep, Emmanuel Elat Assoua Moukete, Javad Eslami, Prosper Pliya, Jean-Marie Bienvenu Ndjaka and Albert Noumowe. Physical, mechanical properties and microstructure of concretes made with natural and crushed aggregates: Application in building construction. Cleaner Materials, vol. 7, 100173, 2023, doi: 10.1016/j.clema.2023.100173.

[21] Ali Abasi, Reza Hassanli, Thomas Vincent and Allan Manalo. Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry. Construction and Building Materials, vol. 264, 120182, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120182.

[22] C.T. Tam, Daneti S. Babu and W. Li. EN 206 conformity testing for concrete strength in compression. Procedia Engineering, vol. 171, pp. 227-237, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.330.

■Ngày nhận bài: 15/10/202 ■Ngày sửa bài: 21/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/10/2026

Đánh giá đặc trưng lý - hóa và tiềm năng sử dụng tro trấu, tro bã mía tại Đồng bằng sông Cửu Long làm phụ gia khoáng

Assessment of physicochemical characteristics and potential use of rice husk ash and sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious materials in the Mekong Delta

> TS LÊ HOÀI BÃO*, TS NGÔ VĂN THỨC
Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
*Email: lehoaibao@mtu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá đặc trưng lý - hóa và tiềm năng sử dụng tro trấu (TT), tro bã mía (TBM) tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) làm phụ gia khoáng cho vật liệu xi măng. Tổng cộng 15 mẫu tro, gồm 12 mẫu TT và 03 mẫu TBM, được phân tích phân bố kích thước hạt (DIA), diện tích bề mặt riêng (BET), thành phần hóa học tại các vùng khảo sát (EDS), hàm lượng mất khi nung (LOI) và chỉ số hoạt tính cường độ. Kết quả cho thấy kích thước hạt trung bình dao động từ 23,09 - 93,34 μm, BET từ 2,12 - 52,42 m^2/g và LOI từ 8,88 - 26,26%. Ở mức thay thế 10% xi măng, có 02/12 mẫu TT đạt chỉ số hoạt tính ≥85% tại 7 ngày. Với mức thay thế 20%, có 07/15 mẫu đạt ngưỡng tham chiếu 75% tại 7 ngày và 13/15 mẫu tại 28 ngày. Nghiên cứu đề xuất 05 nhóm nguồn tro đại diện, cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc lựa chọn và phát triển phụ gia khoáng từ tro sinh khối tại địa phương.

Từ khóa: Tro trấu; tro bã mía; phụ gia khoáng; chỉ số hoạt tính cường độ; Đồng bằng sông Cửu Long.

ABSTRACT

This study evaluates the physicochemical characteristics and potential use of rice husk ash (TT) and sugarcane bagasse ash (TBM) from the Mekong Delta, Vietnam, as supplementary cementitious materials. A total of 15 ash samples, comprising 12 RHA and 3 SCBA samples, were characterized in terms of particle size distribution using dynamic image analysis (DIA), specific surface area (BET), chemical composition at selected regions using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), loss on ignition (LOI) and strength activity index. The results showed that the mean particle size ranged from 23.09 to 93.34 μm, the BET specific surface area from 2.12 to 52.42 m^2/g, and LOI from 8.88% to 26.26%. At a 10% cement replacement level, 2 of the 12 RHA samples achieved a strength activity index of at least 85% at 7 days. At a 20% replacement level, 7 of the 15 samples met the reference threshold of 75% at 7 days, increasing to 13 samples at 28 days. Five representative ash-source groups were proposed, providing an experimental basis for selecting and developing biomass ash as supplementary cementitious materials in the region.

Keywords: Rice husk ash; sugarcane bagasse ash; supplementary cementitious materials; strength activity index; Mekong Delta.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh ngành Xây dựng hướng đến giảm phát thải khí nhà kính và sử dụng hiệu quả tài nguyên, việc nghiên cứu vật liệu khoáng bổ sung (Supplementary Cementitious Materials - SCMs) thay thế một phần xi măng Portland trong vữa và bê tông ngày càng được quan tâm. Trong đó, tro sinh khối từ phụ phẩm nông nghiệp được xem là nguồn vật liệu tiềm năng, góp phần giảm tiêu thụ xi măng và thúc đẩy kinh tế tuần hoàn [1, 2].

Tro trấu (TT) và tro bã mía (TBM) có thể chứa hàm lượng silica đáng kể, có khả năng tham gia phản ứng pozzolan và cải thiện tính chất của vật liệu xi măng [3, 4]. Tuy nhiên, hiệu quả sử dụng phụ thuộc vào trạng thái khoáng vật, kích thước hạt, diện tích bề mặt riêng và điều kiện xử lý. Các nghiên cứu của Thiedeitz và cộng sự [5], Bahurudeen và Santhanam [6], Cordeiro và cộng sự [7] cho thấy công nghệ đốt và phương pháp xử lý ảnh hưởng đáng kể đến hoạt tính của tro. Bên cạnh đó, sự biến động về thành phần hóa học, hàm lượng mất khi nung (Loss on Ignition - LOI) và đặc trưng bề mặt đòi hỏi phải đánh giá đồng thời nhiều chỉ tiêu thay vì chỉ dựa trên hàm lượng silica [8, 9].

ĐBSCL có nguồn phụ phẩm nông nghiệp phong phú từ sản xuất lúa gạo và chế biến mía đường. Năm 2024, sản lượng lúa của vùng đạt khoảng 24,52 triệu tấn [10], tạo nguồn trấu đáng kể phục vụ các hoạt động sản xuất và năng lượng. Tro trấu phát sinh từ nhà máy điện sinh khối và các cơ sở nung gạch - gốm, trong khi TBM chủ yếu

được thu hồi tại nhà máy đường. Nghiên cứu của Nguyễn Trung Thanh và cộng sự (2019) tại An Giang cho thấy lượng TT phát sinh đáng kể, trong khi việc quản lý và tái sử dụng nguồn tro này vẫn còn những hạn chế [11]. Tuy nhiên, sự khác biệt về công nghệ đốt và phương thức thu hồi có thể làm biến động chất lượng tro, gây khó khăn cho việc sử dụng làm phụ gia khoáng. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về TT và TBM [2], [4 - 9], dữ liệu thực nghiệm so sánh các nguồn tro phát sinh trong điều kiện sản xuất thực tế tại ĐBSCL vẫn cần được bổ sung.

Mặc dù TT và TBM đã được nghiên cứu rộng rãi, dữ liệu đối sánh về đặc trưng lý - hóa và chỉ số hoạt tính cường độ của các nguồn tro phát sinh từ những công nghệ đốt khác nhau tại ĐBSCL còn cần được bổ sung. Vì vậy, nghiên cứu tiến hành khảo sát 15 mẫu TT và TBM từ nhà máy điện sinh khối, nhà máy đường và các cơ sở nung gạch - gốm. Điểm nhấn của nghiên cứu là đánh giá đồng thời đặc trưng vật lý, thành phần hóa học tại vùng khảo sát, hàm lượng mất khi nung và chỉ số hoạt tính cường độ, từ đó nhận diện sự khác biệt giữa các nguồn tro và đề xuất các nhóm vật liệu đại diện cho nghiên cứu ứng dụng.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguồn gốc và đặc điểm các mẫu tro sinh khối

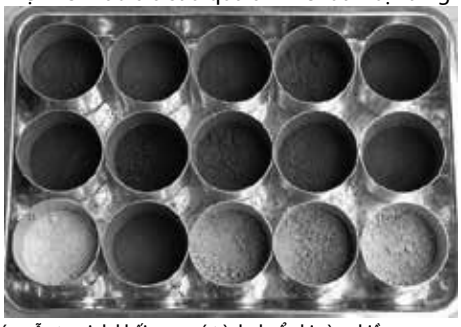
Nghiên cứu sử dụng 15 mẫu tro sinh khối, gồm 12 mẫu TT và 03 mẫu TBM, được thu thập từ các nguồn phát sinh khác nhau tại ĐBSCL. Trong đó, 03 mẫu TBM lấy tại Nhà máy Mía đường Sóc Trăng; 04 mẫu TT gồm tro đáy và tro bay lấy tại Nhà máy điện sinh khối Hậu Giang; 08 mẫu TT còn lại lấy từ các cơ sở nung gạch - gốm sử dụng lò truyền thống và lò liên hoàn tại Mang Thít, Vĩnh Long. Nguồn gốc và ký hiệu các mẫu được trình bày tại Bảng 1.

Bảng 1. Nguồn gốc và ký hiệu các mẫu tro sinh khối

TT	Ký hiệu mẫu	Nguồn phát sinh
1	TBM-ST1, TBM-ST2, TBM-ST3	Nhà máy Mía đường Sóc Trăng (03 vị trí)
2	TT-HG-TD1, TT-HG-TD2	Tro đáy - Nhà máy điện sinh khối Hậu Giang
3	TT-HG-TB1, TT-HG-TB2	Tro bay - Nhà máy điện sinh khối Hậu Giang
4	TT-G0-TT1, TT-G0-TT2	Gạch ống - lò truyền thống, Mang Thít
5	TT-GM-LH1, TT-GM-LH2	Gốm - lò liên hoàn, Mang Thít
6	TT-GM-TT1, TT-GM-TT2	Gốm - lò truyền thống, Mang Thít
7	TT-G-LH1, TT-G-LH2	Gạch - lò liên hoàn, Mang Thít

2.2. Quy trình thu thập và chuẩn bị mẫu

Các mẫu tro được thu thập theo phương pháp lấy mẫu tổng hợp, tại mỗi vị trí khảo sát lấy từ 3 - 5 điểm khác nhau, bao gồm phần bề mặt và bên trong đống tro. Các mẫu đơn được trộn đều để tạo mẫu đại diện. Quá trình chuẩn bị mẫu gồm phơi khô tự nhiên dưới ánh nắng, loại bỏ tạp chất thô và vật liệu chưa cháy có thể nhận biết bằng quan sát. Sau đó, các mẫu được nghiền cơ học bằng máy Los Angeles có bổ sung bi nghiền trong thời gian 3 giờ nhằm giảm sự khác biệt về kích thước hạt ban đầu. Các mẫu sau nghiền được bảo quản riêng theo từng ký hiệu để phục vụ các thí nghiệm tiếp theo. Hình 1 thể hiện 15 mẫu tro sau quá trình chuẩn bị và nghiền.



Hình 1. Các mẫu tro sinh khối sau quá trình chuẩn bị và nghiền

2.3. Phương pháp xác định đặc trưng vật lý và hóa học

Đặc trưng vật lý của các mẫu TT và TBM được xác định thông qua phân bố kích thước hạt bằng phương pháp phân tích ảnh động (Dynamic Image Analysis - DIA) và diện tích bề mặt riêng theo phương pháp hấp phụ khí N_2 (BET) trên thiết bị TriStar II Plus. Trước khi phân tích BET, mẫu được khử khí ở 200 °C trong 15 giờ; quá trình hấp phụ thực hiện tại 77,3 K.

Thành phần nguyên tố của tro được phân tích bằng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS) tích hợp trên kính hiển vi điện tử quét, với điện thế gia tốc 10 kV. Mỗi mẫu được phân tích tại 03 vùng khác nhau và lấy giá trị trung bình, kết quả thành phần được biểu diễn dưới dạng oxit quy đổi. Hàm lượng mất khi nung (LOI) được xác định theo phương pháp tham chiếu TCVN 141:2023 [12] nhằm đánh giá tỷ lệ khối lượng mất đi trong quá trình nung.

2.4. Phương pháp xác định chỉ số hoạt tính cường độ

Chỉ số hoạt tính cường độ của TT và TBM được xác định thông qua tỷ số cường độ chịu nén giữa mẫu vữa sử dụng tro thay thế một phần xi măng và mẫu đối chứng tại cùng tuổi thí nghiệm.

Đối với TT, thí nghiệm được thực hiện theo TCVN 8827:2011 [13] với tỷ lệ thay thế 10% xi măng theo khối lượng. Hỗn hợp vữa được điều chỉnh lượng nước để đạt độ xòe 110 ± 5%, xác định cường độ chịu nén ở tuổi 7 ngày theo TCVN 6016:2011 [14]. Đồng thời, cả TT và TBM được đánh giá ở mức thay thế 20% xi măng theo phương pháp tham chiếu TCVN 6882:2016 [15], với tỷ lệ chất kết dính: cát: nước là 1 : 3 : 0,5 và cường độ chịu nén được xác định ở tuổi 7 và 28 ngày.

$$I_t = \frac{R_{tro-t}}{R_{ĐC-t}} \times 100\% \qquad (1)$$

Trong đó: I_t là chỉ số hoạt tính tại tuổi t, %; $R_{tro\text{-}t}$ và $R_{ĐC\text{-}t}$ lần lượt là cường độ chịu nén của mẫu vữa sử dụng tro và mẫu đối chứng tại cùng tuổi thí nghiệm, MPa.

2.5. Phương pháp xử lý và đánh giá kết quả

Kết quả thí nghiệm được tổng hợp, so sánh giữa các mẫu TT và TBM theo nguồn phát sinh, công nghệ đốt và vị trí thu hồi. Các chỉ tiêu đánh giá gồm phân bố kích thước hạt, diện tích bề mặt riêng BET, thành phần hóa học tại vùng phân tích EDS, hàm lượng mất khi nung (LOI) và chỉ số hoạt tính cường độ.

Đối với TT, chỉ số hoạt tính cường độ ở mức thay thế 10% xi măng được đối chiếu với ngưỡng 85% tại 7 ngày theo TCVN 8827:2011. Ở mức thay thế 20%, kết quả của TT và TBM được so sánh với ngưỡng tham chiếu 75% tại 7 và 28 ngày. Trên cơ sở đó, các mẫu được phân thành ba nhóm: nhóm I đạt ngưỡng tham chiếu ở cả hai tuổi; nhóm II chỉ đạt ở 28 ngày; nhóm III không đạt ở cả hai tuổi. Kết quả phân nhóm được kết hợp với đặc trưng lý - hóa và điều kiện nguồn cung để đánh giá tiềm năng sử dụng, xác định những hạn chế cần xử lý và đề xuất các nguồn tro phù hợp cho nghiên cứu ứng dụng.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng vật lý của tro trấu và tro bã mía

Kết quả phân tích phân bố kích thước hạt bằng phương pháp DIA và diện tích bề mặt riêng BET của 15 mẫu TT và TBM được tổng hợp tại Bảng 2. Mặc dù được xử lý theo cùng quy trình nghiền, các mẫu vẫn thể hiện sự khác biệt đáng kể về đặc trưng vật lý. Kích thước hạt trung bình dao động từ 23,09 đến 93,34 μm, tỷ lệ thể tích hạt lớn hơn 45 μm từ 10,2 đến 71,9%, trong khi diện tích bề mặt riêng BET biến động từ 2,12 đến 52,42 m^2/g.

Bảng 2. Đặc trưng kích thước hạt và diện tích bề mặt riêng của các mẫu TT và TBM

Ký hiệu mẫu	Kích thước trung bình (µm)	Kích thước có tần suất lớn nhất (µm)	Thể tích hạt >45 µm (%)	BET (m^2/g)
TBM-ST1	90,85	94,82	71,9	28,15
TBM-ST2	93,34	94,19	69,7	25,86
TBM-ST3	74,95	83,41	56,5	30,33
TT-HG-TD1	69,54	83,21	57	15,2
TT-HG-TD2	60,86	32,24	42,1	17,52
TT-HG-TB1	69,88	82,68	69,9	51,08
TT-HG-TB2	55,79	19,04	47,8	52,42
TT-GO-TT1	67,6	82,98	51,9	23,28
TT-GO-TT2	34,45	27,89	20,7	52
TT-GM-LH1	93,27	93,91	61,7	13,42
TT-GM-LH2	23,09	24,32	10,2	2,27
TT-GM-TT1	83,96	94,14	68,7	13,4
TT-GM-TT2	41,48	42,82	25,8	16,44
TT-G-LH1	87,03	94,43	64,4	2,12
TT-G-LH2	30,55	32,59	11,3	2,45

Đối với TBM, kích thước hạt trung bình dao động từ 74,95 đến 93,34 µm, với tỷ lệ thể tích hạt lớn hơn 45 µm đạt 56,5 - 71,9%, cho thấy sự hiện diện đáng kể của các hạt tương đối thô. Tuy nhiên, diện tích bề mặt riêng BET của ba mẫu tương đối gần nhau, từ 25,86 đến 30,33 m^2/g. Đối với TT từ Nhà máy điện sinh khối Hậu Giang, kích thước hạt trung bình của tro bay và tro đáy có sự chồng lấn, nhưng BET của tro bay đạt 51,08 - 52,42 m^2/g, cao khoảng 3,2 lần so với tro đáy (15,20 - 17,52 m^2/g). Sự khác biệt này cho thấy vị trí thu hồi có liên quan đáng kể đến đặc trưng bề mặt của TT.

Các mẫu TT từ cơ sở gạch - gốm có mức độ biến động lớn, kể cả giữa những nguồn sử dụng cùng loại hình lò nung. Điển hình, TT-GO-TT1 và TT-GO-TT2 có BET lần lượt là 23,28 và 52,00 m^2/g. Đáng chú ý, mẫu TT-GM-LH2 có kích thước hạt trung bình nhỏ nhất (23,09 µm) nhưng BET chỉ đạt 2,27 m^2/g. Điều này cho thấy kích thước hạt và diện tích bề mặt riêng không nhất thiết biến thiên tương ứng, bởi BET còn chịu ảnh hưởng của hình thái và cấu trúc bề mặt vật liệu.

Nhìn chung, kết quả cho thấy đặc trưng vật lý của TT và TBM phụ thuộc đáng kể vào nguồn phát sinh và điều kiện công nghệ. Trong 12 mẫu TT, chỉ có TT-HG-TB1, TT-HG-TB2 và TT-GO-TT2 đạt BET lớn hơn 30 m^2/g. Tuy nhiên, diện tích bề mặt riêng lớn chưa đủ để khẳng định khả năng phản ứng pozzolan hoặc sự phù hợp của tro làm phụ gia khoáng. Do đó, cần kết hợp các đặc trưng vật lý với thành phần hóa học, hàm lượng mất khi nung và chỉ số hoạt tính cường độ để đánh giá tiềm năng ứng dụng.

3.2. Đặc trưng thành phần hóa học và hàm lượng mất khi nung

Kết quả phân tích EDS và LOI của các mẫu TT và TBM được trình bày tại Bảng 3. SiO_2 là thành phần oxit chiếm ưu thế tại các vùng phân tích, với hàm lượng dao động từ 65,15 - 91,07% đối với TT và 59,70 - 64,54% đối với TBM. Trong đó, TT-GM-LH2 có hàm lượng SiO_2 cao nhất (91,07%). Ngoài SiO_2, các mẫu còn chứa Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO và K_2O với hàm lượng khác nhau, phản ánh sự biến động về thành phần giữa các nguồn tro. Tuy nhiên, hàm lượng SiO_2 cao chưa đủ để khẳng định hoạt tính pozzolan do khả năng phản ứng còn phụ thuộc vào trạng thái khoáng vật và cấu trúc của silica. Kết quả EDS phản ánh thành phần tại các vùng phân tích cục bộ, không đại diện cho thành phần hóa học tổng thể của mẫu. Các giá trị oxit được quy đổi từ kết quả phân tích nguyên tố.

Bảng 3. Thành phần oxit quy đổi từ kết quả EDS và hàm lượng mất khi nung của các mẫu TT và TBM

Ký hiệu mẫu	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	K_2O (%)	C-EDS (%)	LOI (%)
TBM-ST1	59,7	1,04	4,05	2,51	3,08	25,79	21,3
TBM-ST2	64,54	1,27	4,03	2,77	3,47	23,22	21,79
TBM-ST3	62,39	1,19	3,47	2	2,73	26,34	20,95
TT-HG-TD1	73,82	0,62	4,52	1,62	4,33	18,81	16,45
TT-HG-TD2	75,18	–	1,72	1,7	4,73	18,03	17,31
TT-HG-TB1	66,76	0,54	3,8	1,95	4,25	19,81	26,26
TT-HG-TB2	67,41	0,62	2,77	2,18	3,83	20,65	24,38
TT-GO-TT1	79,3	0,35	–	0,79	5,2	14	16,18
TT-GO-TT2	65,15	0,57	2,07	0,87	2,05	28,33	23,55
TT-GM-LH1	79,55	0,67	–	1,18	5,47	12,82	16,53
TT-GM-LH2	91,07	1,23	2,64	0,95	1,88	3,1	8,88
TT-GM-TT1	83,7	0,66	–	–	3,71	11,32	13,38
TT-GM-TT2	84,88	0,69	1,95	0,38	2,71	7,41	17,04
TT-G-LH1	87,01	2,98	3,02	0,68	3,93	3,02	9,63
TT-G-LH2	89,22	2,57	3,54	0,39	1,48	2,42	9,15

Hàm lượng LOI của 15 mẫu dao động từ 8,88 đến 26,26%. Nhóm TBM có LOI tương đối đồng đều (20,95 - 21,79%), trong khi TT biến động đáng kể giữa các nguồn. Đáng chú ý, LOI trung bình của TT bay tại Nhà máy Điện sinh khối Hậu Giang đạt 25,32%, cao hơn TT đáy (16,88%). Các mẫu TT-GM-LH2, TT-G-LH1 và TT-G-LH2 có LOI thấp nhất, lần lượt là 8,88%; 9,63% và 9,15%.

Đối chiếu với TCVN 8827:2011, không có mẫu TT nào đáp ứng yêu cầu LOI không lớn hơn 3% đối với TT nghiền mịn thuộc nhóm phụ gia khoáng hoạt tính cao; trong đó 09/12 mẫu có LOI lớn hơn 10%. Kết quả cho thấy các nguồn tro khảo sát tuy có tiềm năng về thành phần chứa silica nhưng cần được kiểm soát chất lượng và xem xét xử lý bổ sung trước khi ứng dụng. Việc đánh giá khả năng đóng góp cường độ của tro cần tiếp tục dựa trên kết quả thí nghiệm chỉ số hoạt tính cường độ.

3.3. Đánh giá chỉ số hoạt tính cường độ của các nguồn tro

Kết quả xác định chỉ số hoạt tính cường độ của các mẫu TT và TBM được tổng hợp tại Bảng 4. Đối với 12 mẫu TT ở mức thay thế 10% xi măng theo TCVN 8827:2011, chỉ số hoạt tính tại 7 ngày dao động từ 58,9 - 88,2%. Trong đó, chỉ có 02 mẫu TT-HG-TB1 (85,2%) và TT-GM-TT2 (88,2%) đạt ngưỡng yêu cầu không nhỏ hơn 85%. Kết quả cho thấy khả năng đóng góp cường độ của TT có sự khác biệt đáng kể giữa các nguồn phát sinh.

Bảng 4. Chỉ số hoạt tính cường độ của các mẫu TT và TBM

Ký hiệu mẫu	I_7 – 10% (%)	I_7 – 20% (%)	I_{28} – 20% (%)
TBM-ST1	–	84,4	94
TBM-ST2	–	79,3	97,8
TBM-ST3	–	81	97,8
TT-HG-TD1	80,5	66,4	90,9
TT-HG-TD2	80,8	66,4	89,3
TT-HG-TB1	85,2	80,3	90

TT-HG-TB2	83,8	79	88,4
TT-GO-TT1	58,9	41	76,9
TT-GO-TT2	79,1	77,3	92,2
TT-GM-LH1	76,8	64,7	79,6
TT-GM-LH2	70	63,1	81,6
TT-GM-TT1	80,1	68,8	91,3
TT-GM-TT2	88,2	84,4	100,7
TT-G-LH1	63,3	45,4	73,6
TT-G-LH2	78,8	65,1	66,9

Ghi chú: I_7 và I_{28} lần lượt là chỉ số hoạt tính cường độ ở tuổi 7 và 28 ngày. Các cột 10% và 20% thể hiện tỷ lệ thay thế xi măng theo khối lượng; dấu "–" biểu thị không thực hiện thí nghiệm. Hai chương trình thí nghiệm sử dụng điều kiện thử khác nhau nên không so sánh trực tiếp các giá trị chỉ số hoạt tính giữa hai tỷ lệ thay thế.

Ở mức thay thế 20% xi măng, chỉ số hoạt tính của 15 mẫu tại 7 ngày dao động từ 41,0 - 84,4%, với 07/15 mẫu đạt ngưỡng tham chiếu 75% theo TCVN 6882:2016. Đến 28 ngày, chỉ số hoạt tính đạt 66,9 - 100,7%, trong đó có 13/15 mẫu đạt ngưỡng tham chiếu. Kết quả cho thấy khả năng duy trì cường độ tương đối so với mẫu đối chứng của phần lớn nguồn tro được cải thiện ở tuổi 28 ngày.

Đáng chú ý, cả 03 mẫu TBM đều đạt ngưỡng tham chiếu ở hai tuổi, với I_{28} từ 94,0 đến 97,8%. Đối với TT, mẫu TT-GM-TT2 có I_{28} cao nhất (100,7%), tiếp theo là TT-GO-TT2 (92,2%). Hai mẫu TT bay Hậu Giang đạt I_{28} từ 88,4 đến 90,0%, trong khi nhóm TT đáy đạt 89,3 - 90,9%. Ngược lại, TT-G-LH1 và TT-G-LH2 có chỉ số hoạt tính tại 28 ngày thấp nhất, lần lượt là 73,6% và 66,9%. Nhìn chung, kết quả cho thấy TT và TBM có tiềm năng đóng góp cường độ khi thay thế một phần xi măng, đặc biệt ở tuổi 28 ngày.

Sự gia tăng chỉ số hoạt tính từ 7 đến 28 ngày cho thấy khả năng duy trì cường độ tương đối của vữa chứa tro được cải thiện theo tuổi thí nghiệm. Tuy nhiên, kết quả này chưa đủ để xác định riêng mức độ phản ứng pozzolan, do cường độ còn chịu ảnh hưởng của hiệu ứng vật lý và quá trình thủy hóa trong hệ chất kết dính.

3.4. Đánh giá và lựa chọn các nguồn tro có tiềm năng ứng dụng

Trên cơ sở kết quả phân tích đặc trưng lý - hóa và chỉ số hoạt tính cường độ, 15 mẫu TT và TBM được đánh giá, phân loại theo ngưỡng tham chiếu 75% ở mức thay thế 20% xi măng. Kết quả xác định 07 mẫu thuộc nhóm I (đạt ngưỡng ở cả 7 và 28 ngày), 06 mẫu thuộc nhóm II (chỉ đạt ở 28 ngày) và 02 mẫu thuộc nhóm III (không đạt ở cả hai tuổi). Trong đó, nhóm I gồm 03 mẫu TBM, 02 mẫu TT bay Hậu Giang, TT-GO-TT2 và TT-GM-TT2, thể hiện triển vọng về khả năng đóng góp cường độ. Đáng chú ý, TT-GM-TT2 đạt chỉ số hoạt tính cao nhất ở 28 ngày (100,7%), đồng thời cùng với TT-HG-TB1 đáp ứng ngưỡng 85% ở phép thử thay thế 10% xi măng theo TCVN 8827:2011.

Để bảo đảm tính đại diện về nguồn phát sinh, công nghệ đốt và phương thức thu hồi, nghiên cứu đề xuất lựa chọn 05 nhóm nguồn tro phục vụ các nghiên cứu ứng dụng tiếp theo, như trình bày tại Bảng 5.

Bảng 5. Các nhóm nguồn tro được lựa chọn cho nghiên cứu ứng dụng

Nhóm	Nguồn tro	Ký hiệu mẫu	I_{28} trung bình (%)	Khoảng I_{28} (%)
1	TBM Sóc Trăng	TBM-ST1, ST2, ST3	96,5	94,0 - 97,8
2	TT đáy Hậu Giang	TT-HG-TD1, TD2	90,1	89,3 - 90,9
3	TT bay Hậu Giang	TT-HG-TB1, TB2	89,2	88,4 - 90,0
4	TT lò nung truyền thống	TT-GO-TT1, TT-GO-TT2, TT-GM-TT1, TT-GM-TT2	90,3	76,9 - 100,7
5	TT lò nung liên hoàn	TT-GM-LH1, TT-GM-LH2, TT-G-LH1, TT-G-LH2	75,4	66,9 - 81,6

Kết quả đánh giá cho thấy TBM Sóc Trăng và TT Hậu Giang có chỉ số hoạt tính tương đối đồng đều, trong khi TT từ các cơ sở gạch - gốm biến động đáng kể. Năm nhóm nguồn tro được đề xuất nhằm bảo đảm tính đại diện cho các công nghệ đốt và mức độ chất lượng khác nhau, phục vụ nghiên cứu xử lý và ứng dụng tiếp theo. Việc lựa chọn này không đồng nghĩa với việc các nguồn tro đã đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật của phụ gia khoáng.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy đặc trưng lý - hóa của TT và TBM biến động đáng kể theo nguồn phát sinh và phương thức thu hồi. Đặc biệt, TT bay Hậu Giang có diện tích bề mặt riêng BET cao khoảng 3,2 lần so với TT đáy, trong khi TT từ các lò nung gạch - gốm thể hiện sự không đồng nhất rõ rệt. Điều này cho thấy sự cần thiết phải kiểm soát chất lượng theo từng nguồn tro.

Ở mức thay thế 20% xi măng, phần lớn các mẫu có chỉ số hoạt tính cường độ tương đối cao hơn ở tuổi 28 ngày so với 7 ngày. Nhóm TBM Sóc Trăng cho kết quả tương đối đồng đều, trong khi mẫu TT-GM-TT2 đạt chỉ số hoạt tính cao nhất (100,7%). Trên cơ sở đánh giá tổng hợp, nghiên cứu đề xuất 05 nhóm nguồn tro đại diện có tiềm năng nghiên cứu ứng dụng làm phụ gia khoáng. Tuy nhiên, hàm lượng LOI tương đối cao và sự biến động chất lượng đòi hỏi phải tiếp tục nghiên cứu xử lý, kiểm soát nguyên liệu và đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật trước khi ứng dụng thực tế.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp Bộ Xây dựng, mã số RD16-26, với tên nhiệm vụ "Nghiên cứu khả năng ứng dụng tro sinh khối tại Đồng bằng sông Cửu Long làm phụ gia khoáng hoạt tính cho vữa và bê tông". Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Bộ Xây dựng và Trường Đại học Xây dựng Miền Tây đã tạo điều kiện hỗ trợ thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. C. G. Juenger, R. Snellings and S. A. Bernal. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization and performance insights, Cem. Concr. Res., vol. 122, pp. 257-273, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.05.008.

[2] B. S. Thomas, J. Yang, K. H. Mo, J. A. Abdalla, R. A. Hawileh and E. Ariyachandra, Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review, J. Build. Eng., vol. 40, p. 102332, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102332.

[3] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen and C. G. Vassileva. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. Fuel, vol. 105, pp. 40-76, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.041.

[4] V. Jittin, S. N. Minnu and A. Bahurudeen, Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash. Constr. Build. Mater., vol. 273, p. 121679, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121679.

[5] M. Thiedeitz, W. Schmidt, M. Härder and T. Kränkel. Performance of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material after Production in the Field and in the Lab, Materials (Basel)., vol. 13, no. 19, p. 4319, Sep. 2020, doi: 10.3390/ma13194319.

[6] A. Bahurudeen and M. Santhanam. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash, Cem. Concr. Compos., vol. 56, pp. 32-45, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002.

[7] G. C. Cordeiro, L. M. Tavares and R. D. Toledo Filho, Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification, Cem. Concr. Res., vol. 89, pp. 269-275, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.08.020.

[8] J. Skibsted and R. Snellings. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, Cem. Concr. Res., vol. 124, p. 105799, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105799.

[9] F. Bülbül and L. Courard. Turning Waste into Greener Cementitious Building Material: Treatment Methods for Biomass Ashes-A Review, Materials (Basel)., vol. 18, no. 4, p. 834, Feb. 2025, doi: 10.3390/ma18040834.

[10] Cục Thống kê. Niên giám Thống kê Việt Nam 2024. NXB. Thống kê, Hà Nội, 2025.

[11] T. T. Nguyen, H. N. Nguyen, T. Q. A. Nguyen, P. T. Phan and N. H. Nguyen. Emission and management for rice husk ash in An Giang Province, Viet Nam. J. Vietnamese Environ., vol. 11, no. 1, pp. 21-26, Jun. 2019, doi: 10.13141/jve.vol11.no1.pp21-26.

[12] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 141:2023. Xi măng poóc lăng - Phương pháp phân tích hóa học, 2023.

[13] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 8827:2011. Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silicafume và tro trấu nghiền mịn, 2011.

[14] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6016:2011. Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ, 2011.

[15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6882:2016. Phụ gia khoáng cho xi măng, 2016.

■ Ngày nộp bài: 06/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 03/11/2026

Tương tác giữa xi măng và tro xỉ tầng sôi tuần hoàn trong đất đá thải mỏ than gia cố làm móng đường

Cement-fluidized bed ash interaction in stabilized coal mine waste rock for road bases

> TS ĐÀO PHÚC LÂM[1,*], TS ĐỖ NGỌC TƯỚC[2], KS LÃ MẠNH HẢI[3], TS NGÔ THANH HẢI[4], THS PHẠM TRUNG HIẾU[1]

[1]Khoa Công trình & Viện Đổi mới sáng tạo và Kinh tế số, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

[2]Viện Khoa học công nghệ Mỏ - Vinacomin

[3]Công ty CP Tư vấn đầu tư mỏ và công nghiệp - Vinacomin

[4]Trường Đại học Mỏ - Địa chất

[*]Email: lamdp@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Tro xỉ lò hơi tầng sôi tuần hoàn (CFB) Cẩm Phả giàu than chưa cháy (mất khi nung 18,4%) và nằm ngoài giới hạn của TCVN 10302:2014. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi măng (4, 6, 8%) đến tác dụng của loại tro này (7, 9, 11%) trong đất đá thải mỏ than gia cố. Tương tác xi măng × tro có ý nghĩa ở mọi chỉ tiêu ($p < 0,001$). Khi tro tăng từ 7% lên 11%, cường độ nén 14 ngày tăng 56% ở 4% xi măng nhưng giảm 28% và 15% ở 6% và 8% xi măng, còn cường độ ép chẻ biến đổi ngược lại. Hỗn hợp 4% xi măng + 11% tro chỉ giữ 62% cường độ sau 12 chu kỳ khô - ẩm. Mô-đun đàn hồi 28 ngày quan hệ tuyến tính với cường độ nén ($R^2 = 0,93$). Tổ hợp 6% xi măng + 7% tro và nhóm 8% xi măng phù hợp cho móng trên đường chuyên dùng mỏ.

Từ khóa: Tro giàu than chưa cháy; cường độ nén; mô-đun đàn hồi; độ bền khô - ẩm; phân tích phương sai; đường mỏ.

ABSTRACT

Circulating fluidized bed (CFB) ash from Cam Pha, Vietnam, is rich in unburnt carbon (loss on ignition 18.4%) and falls outside TCVN 10302:2014. This study examined how cement content (4, 6, 8%) changes the effect of this ash (7, 9, 11%) in stabilized coal mine waste rock. The cement × ash interaction was significant for every property ($p < 0.001$). Raising the ash content from 7 to 11% increased the 14-day compressive strength by 56% at 4% cement but reduced it by 28% and 15% at 6% and 8% cement, while the tensile strength changed in the opposite direction. The 4% cement + 11% ash mix retained only 62% of its strength after 12 wetting-drying cycles. The 28-day elastic modulus was linearly related to compressive strength ($R^2 = 0.93$). The 6% cement + 7% ash mix and the 8% cement group suit upper bases of mine haul roads.

Keywords: High-carbon fly ash; compressive strength; elastic modulus; wetting–drying durability; analysis of variance; mine haul road.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các mỏ than Quảng Ninh đổ thải khoảng 150 triệu m^3 đất đá mỗi năm [1] và các nhà máy nhiệt điện than cả nước phát sinh khoảng 25 triệu tấn tro xỉ mỗi năm [2]. Gia cố đất đá thải bằng xi măng và tro xỉ để làm móng đường mỏ có thể xử lý đồng thời hai nguồn thải này.

Cốt liệu gia cố xi măng - tro than đã được thử nghiệm làm lớp móng [3, 4]; đá thải mỏ than gia cố xi măng, vôi hoặc tro bay dùng được cho móng đường mỏ [5, 6]. Ở Việt Nam, tro xỉ nhiệt điện đã được dùng làm nền đắp [7], lớp móng gia cố xi măng [8] và cấp phối đá dăm gia cố [9]; đất đá thải Cao Sơn gia cố 6 - 8% xi măng và 7 - 11% tro xỉ đáp ứng yêu cầu cơ bản của móng đường mỏ [10].

Các nghiên cứu trên chủ yếu dùng tro lò than phun, gần với yêu cầu của ASTM C618 và TCVN 10302 [11]. Tro CFB có hạt xốp, có thể chứa CaO tự do và SO_3 [12]; than chưa cháy làm tăng lượng nước yêu cầu [13]. Phản ứng puzolan của tro bị hạn chế khi thiếu $Ca(OH)_2$ [14], nên tác dụng của tro có thể thay đổi theo hàm lượng xi măng, nhất là khi tro vượt mức 15 - 25% chất kết dính mà TCVN 8858:2023 khuyến nghị. Điều này, cùng mô-đun đàn hồi, cường độ ép chẻ và độ bền khô - ẩm [15] chưa được lượng hóa cho đá thải mỏ [10].

Bài báo dùng ma trận 4, 6, 8% xi măng × 7, 9, 11% tro và phân tích phương sai hai yếu tố để xác định tác dụng của tro có phụ thuộc hàm lượng xi măng không, đối chiếu ở khoảng xi măng nào và tổ hợp nào đạt yêu cầu khi đối chiếu tham khảo với TCVN 8858:2023; số liệu γ_{kmax}, CBR và q_u 28 ngày của nhóm 6 - 8% xi măng lấy từ [10].

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Đất đá thải mỏ

Đất đá thải được lấy tại bãi thải Bàng Nâu, mỏ than Cao Sơn (Quảng Ninh) (Hình 1a). Vật liệu là hỗn hợp đất và đá nổ mìn, cỡ hạt lớn nhất khoảng 50 mm, lượng lọt sàng 4,75 và 0,075 mm là 34,5% và 14,4% [10], thuộc miền cấp phối loại B của TCVN 8858:2023; các chỉ tiêu khác ở Bảng 1. Hạt lớn hơn 19 mm được thay bằng hạt 4,75 - 19 mm theo phương pháp II-D của TCVN 12790:2020.

Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý của đất đá thải Bàng Nâu [16]

Chỉ tiêu	Giá trị	Tiêu chuẩn thí nghiệm
Giới hạn chảy W_L / giới hạn dẻo W_P (%)	22,18 / 13,62	TCVN 4197:2012
Chỉ số dẻo I_p (%)	8,56	TCVN 4197:2012
Khối lượng riêng ρ (g/cm^3)	2,70	TCVN 4195:2012
Khối lượng thể tích khô lớn nhất γ_{kmax} (g/cm^3) / độ ẩm tốt nhất W_{tn} (%)	2,22 / 6,40	TCVN 12790:2020, phương pháp II-D
CBR ngâm nước 96 h tại K95 / K98 / K100 (%)	31,7 / 43,5 / 55,5	TCVN 12792:2020
Mô-đun đàn hồi tại K100 (MPa)	74,6	22TCN 211-06, B.5.2; TCCS 38:2022, B.4.3
Cường độ nén của đá, khô / bão hòa (MPa)	87,2 / 81,2	TCVN 7572-10:2006

2.2. Xi măng và nước

Xi măng là xi măng poóc lăng hỗn hợp PCB40 Cẩm Phả theo TCVN 6260:2020; nước trộn theo TCVN 4506:2012.

2.3. Tro xỉ CFB

Tro được lấy tại bãi chứa tro xỉ khô của Nhà máy Nhiệt điện Cẩm Phả, dùng lò hơi tầng sôi tuần hoàn (Hình 1b; Bảng 2). Lượng mất khi nung thực đo 18,4% vượt giới hạn 6% của ASTM C618 [11]; tổng $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (60,9%) thấp hơn mức 70% của TCVN 10302:2014. Vì vậy, tro được gọi là tro CFB giàu than chưa cháy.

Bảng 2. Thành phần hóa và mất khi nung của tro (%) [16]

Chỉ tiêu	Cẩm Phả (số liệu nhà máy)	Cẩm Phả (số liệu thực đo)
SiO_2	23	41,61
Al_2O_3	14,9	16,41
Fe_2O_3	6,3	2,89
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	44,2	60,91
CaO	1,7	–
SO_3	KPH	–
Mất khi nung	9,6	18,43



Hình 1. a) - Đất đá thải tại bãi thải Bàng Nâu



HÌnh 1. b) - Tro xỉ CFB tại bãi chứa của Nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả

2.4. Thiết kế thí nghiệm, chế bị và bảo dưỡng mẫu

Ma trận gồm 4, 6, 8% xi măng và 7, 9, 11% tro theo khối lượng đất đá thải khô; mỗi chỉ tiêu ở mỗi tuổi được xác định trên 3 mẫu, tổng cộng 108 tổ mẫu (Bảng 3) [16].

Bảng 3. Chỉ tiêu, tuổi mẫu và tiêu chuẩn thí nghiệm [16]

Chỉ tiêu	Tuổi / trạng thái	Mẫu	Tiêu chuẩn	Số tổ mẫu
Đầm nén (γ_{kmax}, W_{tn})	–	Cối 152,4 × 116,4 mm	TCVN 12790:2020, phương pháp II-D	9
CBR	K95, K98, K100; ngâm 96 h	Cối CBR 152,4 mm; 10, 30, 65 chày/lớp	TCVN 12792:2020	9
Mô-đun đàn hồi E	14 và 28 ngày	Mẫu trong khuôn, nén tấm ép	22TCN 211-06, B.5.2; TCCS 38:2022, B.4.3	18

Cường độ nén q_u	14 và 28 ngày	Trụ 101,6 × 116,4 mm	ASTM D1633, phương pháp A [17]	18
Cường độ ép chẻ R_{kc}	14 và 28 ngày	Trụ 101,6 × 116,4 mm	TCVN 8862:2011	18
q_u và R_{kc} bão hòa	28 ngày; ngâm 2 ngày	Như trên	ASTM D1633; TCVN 8862:2011	18
Chu kỳ bão hòa - sấy khô	5 và 12 chu kỳ	Như trên	22TCN 59-84 [18]	18

Hỗn hợp được trộn ở độ ẩm tốt nhất, ủ kín 1 h [18] rồi đầm Proctor cải tiến (mẫu 101,6 × 116,4 mm, phương pháp II-C của TCVN 12790:2020). Mẫu CBR được ngâm 96 h ngay sau khi đầm theo TCVN 12792:2020; các mẫu khác được bảo dưỡng ẩm ở 23 ± 1,7°C, độ ẩm ≥ 96% [18], [19]. Mẫu "khô" được nén ngay sau bảo dưỡng, mẫu bão hòa được ngâm 2 ngày trước khi nén [18]. Tốc độ nén 3 mm/phút theo TCVN 9843:2013; tốc độ này và việc không ngâm mẫu khô 4 h khác với ASTM D1633 [17], nên q_u khô có thể cao hơn giá trị theo ASTM D1633.

Mô-đun đàn hồi được đo bằng tấm ép 4 - 5 cm trên mẫu trong khuôn, gia tải đến 0,20 - 0,25 MPa, theo mục B.5.2 của 22TCN 211-06 (tương ứng mục B.4.3 của TCCS 38:2022/TCĐBVN). Phương pháp này dành cho đất nền, trong khi vật liệu gia cố vô cơ được quy định nén nở hông tự do theo TCVN 9843:2013, nên E chỉ dùng để so sánh các hỗn hợp.

Mỗi chu kỳ khô - ẩm gồm sấy mẫu ở 70°C rồi ngâm bão hòa 2 ngày [18]; nghiên cứu kéo dài từ 5 lên 12 chu kỳ, bắt đầu sau 7 ngày bảo dưỡng, sấy 42 h như ASTM D559/D559M [20]. Mẫu và chế độ bảo dưỡng khác TCVN 8858:2023, nên phép đối chiếu ngưỡng ở Mục 3.5 chỉ mang tính tham khảo.

2.5. Xử lý số liệu

Kết quả là trung bình ± độ lệch chuẩn của 3 mẫu (1 MPa = 10 daN/cm^2); γ_{kmax} của nhóm 8% xi măng lấy theo [10]. Độ bền nước được đánh giá bằng hệ số hóa mềm K_{bh} và hệ số bền khô - ẩm K_{12}:

$$K_{bh} = \frac{q_{u,bh}}{q_{u,28}} \quad (1)$$

$$K_{12} = \frac{q_{u,12}}{q_{u,28}} \quad (2)$$

Trong đó: $q_{u,bh}$, $q_{u,12}$, $q_{u,28}$ là cường độ nén trung bình khi bão hòa, sau 12 chu kỳ và ở 28 ngày. K_{bh} là hệ số hóa mềm theo 22TCN 59-84 [18], với mẫu khô là mẫu bảo dưỡng ẩm, không sấy; K_{12} phản ánh mức suy giảm do khô - ẩm lặp lại. Ảnh hưởng của xi măng, tro và tương tác được kiểm định bằng phân tích phương sai hai yếu tố có lặp (α = 0,05; độ lớn ảnh hưởng theo η^2 riêng phần); quan hệ E - q_u được xác định bằng hồi quy tuyến tính trên 27 mẫu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng đầm nén và CBR

Tăng tro làm giảm γ_{kmax} và tăng W_{tn} (Bảng 4): khi tro tăng từ 7% lên 11%, γ_{kmax} giảm 2,8%, 2,7% và 1,3% ở 4, 6 và 8% xi măng, còn W_{tn} tăng từ 8,6 - 9,5% lên 10,1 - 10,7%. W_{tn} chỉ phụ thuộc tro (F = 99,4) và tương tác, không phụ thuộc riêng xi măng (p = 0,194) (Bảng 5). Điều này phù hợp với hạt tro CFB xốp và than chưa cháy hút nhiều nước [12, 13].

Bảng 4. Đặc trưng đầm nén, CBR và cường độ của 9 tổ hợp

XM + TX (%)	γ_{kmax} (g/cm^3)	W_{tn} (%)	CBR K98 (%)	q_u 14 ngày (MPa)	q_u 28 ngày (MPa)	R_{kc} 14 ngày (MPa)	R_{kc} 28 ngày (MPa)
4 + 7	2,053 ± 0,004	9,47 ± 0,11	194 ± 5	1,77 ± 0,02	2,08 ± 0,03	0,503 ± 0,006	0,593 ± 0,004
4 + 9	2,054 ± 0,008	8,89 ± 0,18	206 ± 5	2,07 ± 0,06	2,29 ± 0,05	0,489 ± 0,008	0,590 ± 0,008
4 + 11	1,996 ± 0,008	10,66 ± 0,43	215 ± 5	2,76 ± 0,05	2,94 ± 0,05	0,466 ± 0,009	0,528 ± 0,009
6 + 7	2,067 ± 0,008	8,63 ± 0,13	237 ± 7	3,51 ± 0,05	4,09 ± 0,05	0,597 ± 0,006	0,651 ± 0,010
6 + 9	2,027 ± 0,006	9,63 ± 0,16	234 ± 5	2,96 ± 0,05	3,48 ± 0,06	0,626 ± 0,006	0,683 ± 0,008
6 + 11	2,011 ± 0,005	10,39 ± 0,16	227 ± 4	2,54 ± 0,03	3,05 ± 0,04	0,656 ± 0,007	0,723 ± 0,008
8 + 7	2,110 ± 0,010	9,23 ± 0,21	283 ± 8	4,41 ± 0,04	4,76 ± 0,04	0,801 ± 0,004	0,913 ± 0,002
8 + 9	2,095 ± 0,001	9,14 ± 0,16	279 ± 7	3,89 ± 0,02	4,32 ± 0,03	0,814 ± 0,006	0,925 ± 0,006
8 + 11	2,083 ± 0,002	10,10 ± 0,21	265 ± 11	3,76 ± 0,05	4,10 ± 0,06	0,878 ± 0,010	0,997 ± 0,009

XM: Xi măng; TX: Tro xỉ CFB (% khối lượng đất đá thải khô). Trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Số liệu γ_{kmax}, CBR và q_u 28 ngày của nhóm 6 - 8% xi măng đã công bố trong [10].

Bảng 5. Phân tích phương sai hai yếu tố có tương tác (bậc tự do: XM 2, TX 2, XM×TX 4, sai số 18)

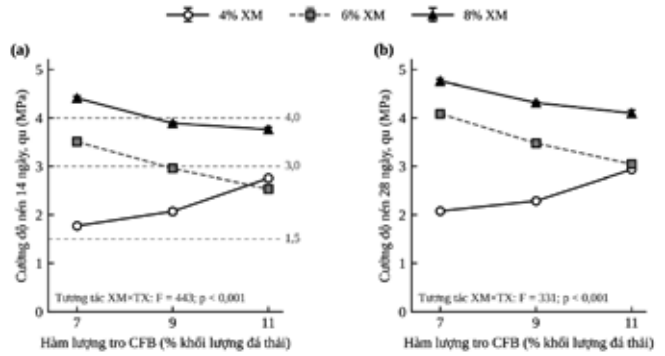
Chỉ tiêu	F (XM)	p (XM)	F (TX)	p (TX)	F (XM×TX)	p (XM×TX)	η^2 riêng phần (XM×TX)
γ_{kmax}	293,8	< 0,001	126,3	< 0,001	17,9	< 0,001	0,80
W_{tn}	1,8	0,194	99,4	< 0,001	12,7	< 0,001	0,74
CBR K98	258,4	< 0,001	0,8	0,456	7,7	< 0,001	0,63
q_u 14 ngày	4002,8	< 0,001	90,5	< 0,001	442,9	< 0,001	0,99
q_u 28 ngày	3770,6	< 0,001	103,5	< 0,001	330,8	< 0,001	0,99
R_{kc} 14 ngày	5613,5	< 0,001	52,7	< 0,001	63,7	< 0,001	0,93
R_{kc} 28 ngày	5985,6	< 0,001	37,4	< 0,001	109,4	< 0,001	0,96
E 14 ngày	4792,4	< 0,001	36,6	< 0,001	128,8	< 0,001	0,97
E 28 ngày	3320,3	< 0,001	34,0	< 0,001	88,7	< 0,001	0,95

q_u bão hòa	4971,9	< 0,001	180,1	< 0,001	182,4	< 0,001	0,98
q_u sau 12 chu kỳ	4319,0	< 0,001	53,9	< 0,001	179,0	< 0,001	0,98

CBR ở K98 đạt 194 - 283%, gấp 4,5 - 6,5 lần đất đá thải chưa gia cố, do xi măng quyết định (F = 258,4) [21]. Tro không có ảnh hưởng riêng (p = 0,456) nhưng tương tác có ý nghĩa (F = 7,7): Khi tro tăng từ 7% lên 11%, CBR tăng 11% ở 4% xi măng nhưng giảm 4 - 6% ở 6 - 8% xi măng. Mẫu CBR được ngâm ngay sau khi đầm, nên CBR phản ánh giai đoạn thủy hóa sớm, khi phản ứng puzolan chưa đáng kể.

3.2. Cường độ nén và cường độ ép chẻ

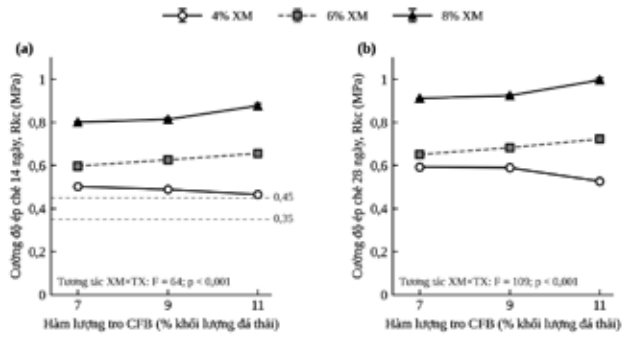
Tác dụng của tro lên cường độ nén đổi chiều theo hàm lượng xi măng (Hình 2). Khi tro tăng từ 7% lên 11%, q_u 14 ngày tăng 56% ở 4% xi măng nhưng giảm 28% và 15% ở 6% và 8% xi măng; ở 28 ngày lần lượt là +41%, −25% và −14%. Tương tác rất mạnh (F = 442,9 và 330,8; η^2 riêng phần 0,99), với ngưỡng đổi chiều giữa 4% và 6% xi măng, được nội suy từ ba mức thí nghiệm. Vì mỗi tổ hợp được đầm ở γ_{kmax} và W_{tn} riêng, tác dụng của tro bao gồm cả ảnh hưởng gián tiếp qua độ chặt và lượng nước. Kết quả này ngược với đất sét gia cố, trong đó tro bay chỉ thay được một phần xi măng khi xi măng đủ nhiều [22], nhưng phù hợp với cấp phối xỉ thép gia cố 4% xi măng có tro bay [23].



Đường nét đứt: Ngưỡng 4,0; 3,0 và 1,5 MPa của TCVN 8858:2023; thanh sai số: ± 1 độ lệch chuẩn

Hình 2. Tương tác xi măng - tro CFB đối với cường độ nén: a) - 14 ngày; b) - 28 ngày

Cường độ ép chẻ biến đổi ngược lại (Hình 3): R_{kc} 14 ngày giảm 7% ở 4% xi măng nhưng tăng 10% ở 6% và 8% xi măng (F tương tác = 63,7), nên R_{kc}/q_u dao động 0,16 - 0,29.



Đường nét đứt: ngưỡng 0,45 và 0,35 MPa của TCVN 8858:2023

Hình 3. Tương tác xi măng-tro CFB đối với cường độ ép chẻ: a) - 14 ngày; b) - 28 ngày

Sự đổi chiều của q_u có thể do hai cơ chế ngược nhau. Khi xi măng ít (4%), $Ca(OH)_2$ không đủ cho phản ứng puzolan; tro chủ yếu lấp rỗng và phân tán các cụm hạt [14] và vì đá thải chỉ có 14,4% hạt lọt sàng 0,075 mm, khung hạt chặt hơn làm cường độ tăng. Khi xi măng đủ nhiều (6 - 8%), tro giàu than chưa cháy chủ yếu pha loãng chất kết dính và tăng lượng nước yêu cầu [13, 21]; tro nghèo CaO (1,7%) nên khả năng tự đóng rắn của tro CFB [12] không đáng kể. Mức tăng cường độ từ 14 đến 28 ngày (Bảng 4) phù hợp với cách giải thích này: Ở 4% xi măng, mức tăng giảm từ 17% xuống 6,5% khi tro tăng từ 7% lên 11%, tức lợi ích của tro hình thành chủ yếu ở tuổi sớm, phù hợp với tác dụng lấp rỗng; ở 6% xi măng, mức tăng tăng nhẹ (16,5% → 20,1%), cho thấy tro có đóng góp muộn khi đủ $Ca(OH)_2$. Khi chưa có phân tích vi cấu trúc, đây vẫn là giả thuyết; chiều ngược lại của R_{kc} cũng cần nghiên cứu thêm.

Hệ số biến động của q_u 28 ngày chỉ 0,7 - 2,2% (Bảng 6), làm giá trị F rất lớn; ý nghĩa thực tiễn vì vậy được đánh giá qua chênh lệch tuyệt đối giữa các tổ hợp.

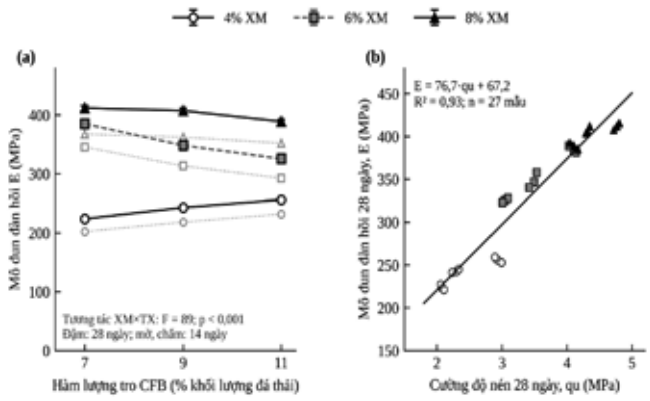
3.3. Mô-đun đàn hồi

Mô-đun đàn hồi biến đổi cùng chiều với cường độ nén (Hình 4a): Khi tro tăng từ 7% lên 11%, E 28 ngày tăng 14% ở 4% xi măng nhưng giảm 15% và 6% ở 6% và 8% xi măng (F tương tác = 88,7) và gấp 3,0 - 5,5 lần đất đá thải chưa gia cố (74,6 MPa).

Bảng 6. Mô-đun đàn hồi và độ bền nước

XM + TX (%)	E 14 ngày (MPa)	E 28 ngày (MPa)	q_u bão hòa (MPa)	q_u sau 12 chu kỳ (MPa)	K_{bh}	K_{12}	CV q_u 28 ngày (%)
4 + 7	202 ± 1	224 ± 3	1,96 ± 0,03	1,52 ± 0,02	0,94	0,73	1,2
4 + 9	218 ± 2	243 ± 2	2,07 ± 0,05	1,64 ± 0,04	0,91	0,72	2,2
4 + 11	232 ± 2	256 ± 3	2,31 ± 0,06	1,83 ± 0,06	0,79	0,62	1,8
6 + 7	346 ± 3	385 ± 4	3,73 ± 0,04	2,93 ± 0,04	0,91	0,72	1,3
6 + 9	314 ± 2	348 ± 9	3,24 ± 0,03	2,91 ± 0,03	0,93	0,84	1,7
6 + 11	293 ± 3	326 ± 3	2,75 ± 0,05	2,18 ± 0,04	0,90	0,72	1,4
8 + 7	368 ± 5	412 ± 4	4,44 ± 0,05	3,55 ± 0,05	0,93	0,74	0,9
8 + 9	362 ± 3	407 ± 4	4,11 ± 0,02	3,29 ± 0,02	0,95	0,76	0,7
8 + 11	352 ± 5	389 ± 4	3,91 ± 0,06	3,42 ± 0,05	0,95	0,83	1,6

K_{bh} (hệ số hóa mềm) = q_u bão hòa / q_u 28 ngày; K_{12} (hệ số bền khô - ẩm) = q_u sau 12 chu kỳ khô - ẩm / q_u 28 ngày (tỉ số của giá trị trung bình). CV: Hệ số biến động.



a) - Đường nét đậm: 28 ngày; đường nét mờ: 14 ngày; b) - 27 mẫu, đường hồi quy theo công thức (3)

Hình 4. Mô-đun đàn hồi: a) - Theo tổ hợp ở 28 ngày và 14 ngày; b) - Tương quan E – q_u ở 28 ngày

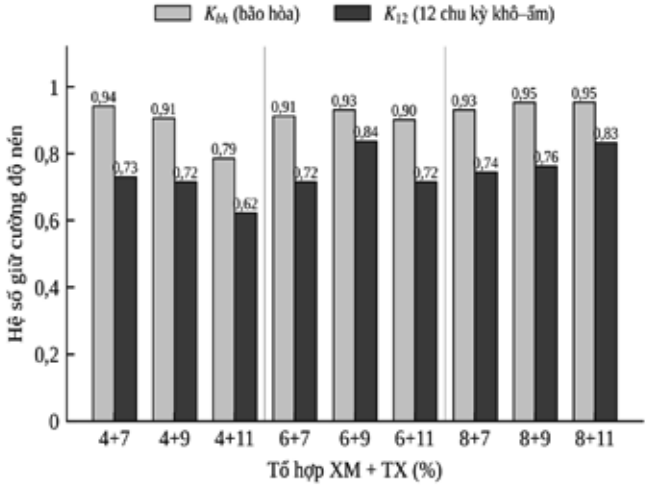
Trên 27 mẫu, E và q_u ở 28 ngày có quan hệ tuyến tính chặt (Hình 4b), theo công thức (3):

$$E_{28} = 76{,}7q_{u,28} + 67{,}2 \quad \text{(MPa)} \qquad (3)$$

Với R^2 = 0,93; ở 14 ngày, E = 69,0·q_u + 86,4 (R^2 = 0,86). Quan hệ này cho phép ước lượng E từ thí nghiệm nén (q_u 2 - 4,8 MPa) trong phạm vi nghiên cứu. Tuy nhiên, E ở đây được đo bằng tấm ép 4 - 5 cm trên mẫu còn trong khuôn (Mục 2.4) và tính theo lời giải bán không gian đàn hồi với hệ số Poisson giả định; trị số này phụ thuộc vào điều kiện biên của khuôn và mức ứng suất thấp (0,20 - 0,25 MPa), khác với mô-đun nén dọc trục nở hông tự do trên mẫu bão hòa. Vì vậy, các hệ số của công thức (3) chỉ dùng để so sánh các hỗn hợp trong nghiên cứu này, không so sánh trực tiếp được với các tương quan E - q_u dùng mô-đun nén dọc trục [24] và không thay cho mô-đun thiết kế.

3.4. Độ bền nước và chu kỳ khô - ẩm

Phần lớn hỗn hợp giữ 90 - 95% cường độ nén khi bão hòa và 72 - 84% sau 12 chu kỳ (Hình 5). Ngoại lệ là hỗn hợp 4% xi măng + 11% tro: Cường độ khô cao nhất nhóm 4% xi măng nhưng K_{bh} = 0,79 và K_{12} = 0,62, thấp nhất ma trận; lợi ích của tro so với hỗn hợp 4% xi măng + 7% tro giảm từ +41% (khô) xuống +18% (bão hòa) và +20% (12 chu kỳ). Phần cường độ tăng nhờ tro khi xi măng ít vì vậy kém bền nước, phù hợp với cơ chế lấp rỗng ở mục 3.2; ngược lại, ở 8% xi măng, K_{12} tăng theo lượng tro (0,74 → 0,83).



K_{bh}, K_{12} tính theo công thức (1), (2) từ giá trị trung bình 3 mẫu [16]

Hình 5. Hệ số hóa mềm (K_{bh}) và hệ số bền khô - ẩm sau 12 chu kỳ (K_{12}) của 9 tổ hợp

Với hệ số biến động của q_u ≤ 2,2%, sai số của K_{12} khoảng ±0,02, nhỏ hơn nhiều khác biệt giữa 0,62 và 0,72 - 0,84. Mẫu sau 12 chu kỳ có tuổi lớn hơn mẫu đối chứng 28 ngày, nên thủy hóa tiếp diễn có thể bù một phần suy giảm; K_{12} vì vậy có thể đánh giá thấp mức suy giảm thực. Kết quả phù hợp với ảnh hưởng của chất kết dính đến độ bền khô - ẩm [15]; K_{12} không so sánh trực tiếp được với ASTM D559/D559M [20], vốn đánh giá tổn thất khối lượng. Ở vị trí dễ ngập nước, nhóm 4% xi măng nên dùng 7 - 9% tro.

3.5. Đối chiếu tham khảo với TCVN 8858:2023 và phạm vi sử dụng

TCVN 8858:2023 yêu cầu q_u 14 ngày ≥ 4,0 MPa và R_{kc} ≥ 0,45 MPa cho móng trên đường cao tốc, cấp I, II; ≥ 3,0 MPa và ≥ 0,35 MPa cho móng trên các trường hợp khác; q_u ≥ 1,5 MPa cho móng dưới. Bảng 7 đối chiếu với q_u 14 ngày nhân 0,96 và nhân thêm K_{bh}; R_{kc} của cả 9 tổ hợp đều ≥ 0,45 MPa.

Bảng 7. Phạm vi sử dụng tham khảo theo ngưỡng TCVN 8858:2023 (tuổi 14 ngày)

Vị trí lớp móng (ngưỡng q_u)	Tổ hợp đạt (q_u × 0,96, MPa)	Ước lượng khi xét ngâm nước (× K_{bh}, MPa)	Lưu ý
Móng trên đường cao tốc, cấp I–II (≥ 4,0)	8 + 7 (4,23)	3,94	Sát ngưỡng; cần thí nghiệm đúng quy trình
Móng trên các trường hợp khác (≥ 3,0)	6 + 7 (3,37); 8 + 7 (4,23); 8 + 9 (3,74); 8 + 11 (3,61)	3,07; 3,94; 3,56; 3,45	6 + 7 sát ngưỡng khi xét ngâm nước
Móng dưới (≥ 1,5)	Cả 9 tổ hợp (thấp nhất 4 + 7: 1,70)	thấp nhất 4 + 7: 1,60	Tránh 4 + 11 ở vị trí dễ ngập nước (K_{12} = 0,62)

Hệ vật liệu này nằm ngoài phạm vi TCVN 8858:2023 (tro không đạt TCVN 8825, ASTM C618 và chiếm 47 - 73% chất kết dính), nên kết quả chỉ để tham khảo. Đánh giá theo tính năng đã được khuyến nghị cho tro ngoài tiêu chuẩn [25] và tro giàu than chưa cháy hoặc tro than gia cố xi măng đã được dùng cho móng đường [21, 4].

4. KẾT LUẬN

1) Tương tác xi măng × tro có ý nghĩa ở cả 11 chỉ tiêu ($p < 0{,}001$); tác dụng của tro chỉ xác định được khi nêu kèm hàm lượng xi măng.

2) Tác dụng của tro đổi chiều trong khoảng 4 - 6% xi măng: Khi tro tăng từ 7% lên 11%, q_u 14 ngày tăng 56% ở 4% xi măng nhưng giảm 28% và 15% ở 6% và 8% xi măng.

3) Phần cường độ tăng nhờ tro khi xi măng ít kém bền nước: Hỗn hợp 4% xi măng + 11% tro có hệ số hóa mềm K_{bh} = 0,79 và hệ số bền khô - ẩm K_{12} = 0,62.

4) Mô-đun đàn hồi 28 ngày: $E_{28} = 76{,}7 \cdot q_{u,28} + 67{,}2$ (MPa), R^2 = 0,93 (q_u 2 - 4,8 MPa).

5) Đối chiếu tham khảo với TCVN 8858:2023, nhóm 8% xi măng và tổ hợp 6% xi măng + 7% tro phù hợp cho móng trên đường chuyên dùng mỏ; không nên dùng 4% xi măng + 11% tro ở vị trí dễ ngập nước.

Nghiên cứu dùng một nguồn đá thải, tro và xi măng, chưa có phân tích vi cấu trúc, nên cơ chế đổi chiều mới là giả thuyết; cần thí nghiệm lại theo đúng TCVN 8858:2023, bổ sung mức 5% xi măng và kiểm chứng hiện trường.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu sử dụng số liệu của đề tài KC.04.Đ13-17/16-20 "Nghiên cứu, gia cố đất đá thải bằng xi măng + tro xỉ nhà máy nhiệt điện và giải pháp công nghệ thi công phù hợp trong kết cấu đường ô tô chuyên dùng và sân bãi nội bộ của TKV", do Công ty Cổ phần Tư vấn đầu tư mỏ và công nghiệp - Vinacomin chủ trì.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tạp chí Công Thương. Thí điểm chế biến đất đá thải mỏ làm vật liệu gia cố, đắp nền. Internet: https://tapchicongthuong.vn/thi-diem-che-bien-dat-da-thai-mo-lam-vat-lieu-gia-co--dap-nen-114746.htm (truy cập: tháng 11/2026).

[2] NQ Pham and KA Le. Coal fly ash in Vietnam and its application as a lightweight material. Chemical Engineering Transactions, vol. 83, pp. 31-36, 2021, doi: 10.3303/CET2183006.

[3] AH Lav, MA Lav and AB Goktepe. Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material. Fuel, vol. 85, no. 16, pp. 2359-2370, 2006, doi: 10.1016/j.fuel.2006.05.017.

[4] DY Wiranata et al. Use of coal ash cement stabilized material as pavement base material: Laboratory characterization and field evaluation. Construction and Building Materials, vol. 344, 128055, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128055.

[5] B Behera and MK Mishra. California bearing ratio and Brazilian tensile strength of mine overburden-fly ash-lime mixtures for mine haul road construction. Geotechnical and Geological Engineering, vol. 30, no. 2, pp. 449-459, 2012, doi: 10.1007/s10706-011-9479-9.

[6] M Amrani et al. Sustainable reuse of coal mine waste: Experimental and economic assessments for embankments and pavement layer applications in Morocco. Minerals, vol. 10, no. 10, 851, 2020, doi: 10.3390/min10100851.

[7] Hoàng Tùng. Nghiên cứu sử dụng đá thải phối trộn với tro xỉ nhà máy nhiệt điện đốt than trong xây dựng nền đường ô tô. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (ĐHXDHN), tập 16, số 3V, tr. 1-6, 2022, doi: 10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(3V)-01.

[8] N Nguyen Thi, S Bui Truong and N Do Minh. Reusing coal ash of thermal power plant in a pavement base course. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, vol. 33, no. 5, pp. 346-354, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.09.017.

[9] VQ Ho, VT Nguyen and CV Nguyen. Effect of fly ash on the mechanical properties and drying shrinkage of the cement treated aggregate crushed stone. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 54, Springer, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-0802-8_65.

[10] LP Dao et al. Laboratory assessment of cement-stabilized coal mine waste rock as pavement foundation materials. E3S Web of Conferences, vol. 687, 01007, 2026, doi: 10.1051/e3sconf/202668701007.

[11] ASTM C618-25a. Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, 2025.

[12] G Jia, Y Wang and F Yang. A review on the application of circulating fluidized bed fly ash in building materials. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2022, 7099430, 2022, doi: 10.1155/2022/7099430.

[13] TBT Nguyen et al. Effects of high loss on ignition fly ash as a partial replacement for sand on the properties of mortars. Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 14, no. 4, pp. 15226-15232, 2024, doi: 10.48084/etasr.7782.

[14] S Horpibulsuk, R Rachan and Y Raksachon. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay. Soils and Foundations, vol. 49, no. 1, pp. 85-98, 2009, doi: 10.3208/sandf.49.85.

[15] NN Khoury and MM Zaman. Influences of various cementitious agents on the performance of stabilized aggregate base subjected to wet-dry cycles. International Journal of Pavement Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 265-276, 2007, doi: 10.1080/10298430701342874.

[16] Lã Mạnh Hải (chủ nhiệm). Nghiên cứu, gia cố đất đá thải bằng xi măng + tro xỉ nhà máy nhiệt điện và giải pháp công nghệ thi công phù hợp trong kết cấu đường ô tô chuyên dùng và sân bãi nội bộ của TKV. Báo cáo đề tài khoa học và công nghệ, mã số KC.04.Đ13-17/16-20. Công ty Cổ phần Tư vấn đầu tư mỏ và công nghiệp - Vinacomin, 2019.

[17] ASTM D1633-17. Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. ASTM International, 2017.

[18] 22TCN 59-84. Quy trình thí nghiệm đất gia cố bằng chất kết dính vôi, xi măng, 1984.

[19] ASTM D1632-07. Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory. ASTM International, 2007, doi: 10.1520/D1632-07.

[20] ASTM D559/D559M-15(2023)e1. Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures. ASTM International, 2023, doi: 10.1520/D0559_D0559M-15R23E01.

[21] B Cetin, AH Aydilek and Y Guney. Stabilization of recycled base materials with high carbon fly ash. Resources, Conservation and Recycling, vol. 54, no. 11, pp. 878-892, 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2010.01.007.

[22] P Jongpradist et al. Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 22, no. 1, pp. 49-58, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(49).

[23] Nguyễn Thị Thúy Hằng. Nghiên cứu sử dụng cấp phối xỉ thép gia cố xi măng - tro bay làm móng đường ô tô. Tạp chí Xây dựng, số 08, tr. 100-103, 2024.

[24] DX Xuan et al. Mechanical properties of cement-treated aggregate material - A review. Materials & Design, vol. 33, pp. 496-502, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.055.

[25] Y Yilmaz et al. Use of standard and off-spec fly ashes for soil stabilization. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 31, no. 2, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002599.

■Ngày nhận bài: 05/10/2026 ■Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Bê tông geopolymer tro bay-xỉ dưỡng hộ ở nhiệt độ thường: Tổng quan về cường độ và các yếu tố ảnh hưởng

Ambient-Cured fly ash-slag geopolymer concrete: A review of strength and Influencing Factors

> TS TRỊNH THỊ HOA
Nhóm nghiên cứu Vật liệu tiên tiến và Hệ thống thông minh cho Hạ tầng và Đường sắt tốc độ cao (AMIS-HSR),
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
Email: hoatt85@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tổng hợp các yếu tố chi phối sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông geopolymer tro bay-xỉ hoạt hóa bằng dung dịch kiềm và dưỡng hộ không gia nhiệt. Dữ liệu được thu thập từ 10 nghiên cứu, sàng lọc theo thành phần tiền chất, chế độ dưỡng hộ và điều kiện thử nghiệm; các hệ chỉ sử dụng tro bay hoặc xỉ làm tiền chất được tách làm đối chứng. Sau khi gộp kết quả từng viên mẫu trong cùng nhóm thí nghiệm, tập dữ liệu gồm 191 kết quả cấp phối/loạt-tuổi, trong đó 136 kết quả thuộc hệ tro bay-xỉ và 55 kết quả đối chứng. Phân tích ưu tiên đối chiếu trong từng nghiên cứu. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của tỷ lệ xỉ phụ thuộc nguyên liệu và dung dịch hoạt hóa; không xác lập được tỷ lệ tối ưu chung. Trong một chuỗi thí nghiệm, tăng tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tiền chất từ 0.40 lên 0.45 tại 30% xỉ làm cường độ 28 ngày tăng từ 35.67 lên 49.00 MPa. Cường độ tiếp tục phát triển sau 28 ngày, trong khi tăng xỉ thường đi kèm giảm độ sụt trong các tổ mẫu được xét. Bài báo đề xuất lựa chọn và hiệu chỉnh cấp phối đồng thời theo yêu cầu cường độ, tính công tác và điều kiện dưỡng hộ, và yêu cầu kiểm chứng bằng thí nghiệm trước khi áp dụng.

Từ khóa: Bê tông geopolymer; tro bay; xỉ hạt lò cao nghiền mịn; cường độ chịu nén; dưỡng hộ nhiệt độ thường.

ABSTRACT

This paper reviews the factors governing compressive strength development in fly ash-slag geopolymer concrete activated with alkaline solutions and cured under ambient conditions without external heating. Data from ten studies were screened based on precursor composition, curing conditions, and testing procedures. Mixtures containing fly ash or slag as the sole precursor were treated as separate controls. After individual specimen results were averaged within matching experimental groups, the dataset comprised 191 mixture/series-age observations, including 136 observations for fly ash-slag blends and 55 controls. The analysis prioritized comparisons within individual studies. The findings indicate that the effect of slag content depends on the precursor characteristics and activator composition; therefore, no universally optimal slag content could be identified. In one experimental series, increasing the activator solution-to-precursor mass ratio from 0.40 to 0.45 at 30% slag increased the 28-day compressive strength from 35.67 to 49.00 MPa. Strength continued to develop beyond 28 days, while higher slag contents generally coincided with lower slump in the series examined. The review proposes an approach to selecting and adjusting mixture proportions that jointly considers compressive strength, workability, and curing conditions, with experimental verification required before application.

Keywords: Geopolymer concrete; fly ash; ground granulated blast-furnace slag; compressive strength; ambient curing.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát triển chất kết dính thay thế xi măng Portland và tận dụng phụ phẩm công nghiệp là hướng nghiên cứu được quan tâm trong lĩnh vực vật liệu xây dựng. Trong đó, bê tông geopolymer sử dụng tro bay và xỉ hạt lò cao nghiền mịn được chế tạo trên cơ sở hoạt hóa các tiền chất bằng dung dịch kiềm. Các nghiên cứu thực nghiệm đã đánh giá cường độ, đặc trưng vi cấu trúc và độ bền của hệ vật liệu này, qua đó cung cấp cơ sở xem xét khả năng ứng dụng trong xây dựng [1, 2]. Tuy nhiên, lựa chọn cấp phối cần gắn với đặc điểm nguyên liệu và điều kiện chế tạo cụ thể.

Đối với bê tông đổ tại chỗ, khả năng đóng rắn và phát triển cường độ trong điều kiện không gia nhiệt có ý nghĩa thực tiễn. Nath

và Sarker [3] đã khảo sát tính chất cơ học của bê tông geopolymer tro bay phối hợp các thành phần bổ sung khi dưỡng hộ ở nhiệt độ phòng. Hadi và cộng sự [4] nghiên cứu lựa chọn cấp phối bê tông xỉ hoạt hóa kiềm và ảnh hưởng của việc thay thế một phần xỉ bằng các tiền chất khác. Kết quả cho thấy cần xem xét đồng thời cường độ, thời gian đông kết và tính công tác, thay vì chỉ lựa chọn cấp phối theo cường độ lớn nhất.

Cường độ của hệ tro bay-xỉ chịu ảnh hưởng của nhiều thông số có quan hệ với nhau. Bellum và cộng sự [5] khảo sát ảnh hưởng của loại dung dịch hoạt hóa; Kunal và cộng sự [6] xem xét nồng độ NaOH, hàm lượng xỉ và chế độ dưỡng hộ; Gopalakrishnan và Chinnaraju [7] đánh giá cường độ và độ bền của các hệ phối hợp trong môi trường xâm thực. Sự khác biệt về nguyên liệu, lượng nước, tuổi thử, mẫu thử và điều kiện bảo quản làm hạn chế khả năng so sánh trực tiếp giữa các nghiên cứu. Vì vậy, cần phân biệt kết quả phát triển cường độ trong điều kiện thông thường với cường độ còn lại sau tác động xâm thực; đồng thời kiểm chứng lại cấp phối khi thay đổi nguồn nguyên liệu.

Bài báo này tổng hợp các yếu tố ảnh hưởng đến sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông geopolymer tro bay-xỉ, đối chiếu các chuỗi thí nghiệm có điều kiện tương đồng và đề xuất định hướng lựa chọn, hiệu chỉnh cấp phối. Phạm vi nghiên cứu tập trung vào hệ hoạt hóa bằng dung dịch kiềm, không chứa xi măng Portland và dưỡng hộ không gia nhiệt; các hệ chỉ sử dụng tro bay hoặc xỉ được xem xét như đối chứng riêng. Việc phân tích được thực hiện trên cơ sở thống nhất định nghĩa thông số, điều kiện thử nghiệm và phạm vi sử dụng dữ liệu.

2. CƠ SỞ VÀ PHẠM VI TỔNG HỢP

2.1. Hệ tiền chất và cơ sở hình thành cường độ

Hệ chất kết dính được xem xét gồm tro bay và xỉ hạt lò cao nghiền mịn, hoạt hóa bằng dung dịch kiềm. Tro bay cung cấp các thành phần chứa silic và nhôm có khả năng phản ứng, trong khi xỉ bổ sung nguồn canxi. Thành phần tiền chất và dung dịch hoạt hóa ảnh hưởng đến quá trình hòa tan, hình thành sản phẩm phản ứng và phát triển cấu trúc chất kết dính [5, 8].

Trong nghiên cứu trên hỗ chất kết dính hoạt hóa kiềm, Ismail và cộng sự [8] ghi nhận rằng, trong các hệ hoạt hóa bằng silicat, sản phẩm phản ứng của tro bay có thể chủ yếu là gel natri aluminosilicat hydrat (N-A-S-H), còn hệ xỉ chủ yếu hình thành gel canxi aluminosilicat hydrat (C-A-S-H). Trong hệ phối hợp, các sản phẩm này có thể đồng tồn tại hoặc biến đổi thành phần theo tỷ lệ tiền chất và tuổi dưỡng hộ. Vì vậy, thuật ngữ "geopolymer" trong bài được sử dụng theo phạm vi nghiên cứu tro bay-xỉ; các hệ giàu xỉ đồng thời được xem xét trong nhóm chất kết dính hoạt hóa kiềm. Việc xác định sản phẩm phản ứng cần dựa trên bằng chứng vi cấu trúc, không chỉ từ cường độ chịu nén.

2.2. Phạm vi tài liệu và quy tắc lọc dữ liệu

Bài báo thực hiện tổng quan chuyên đề trên cơ sở bảng dữ liệu được thu thập từ 10 nghiên cứu, ký hiệu S01-S10. Phạm vi phân tích chính gồm bê tông tro bay-xỉ hoạt hóa bằng dung dịch kiềm, không chứa xi măng Portland và dưỡng hộ không gia nhiệt. Các cấp phối bổ sung metakaolin, silica fume hoặc vôi được loại khỏi tập phân tích. Hệ chỉ sử dụng tro bay hoặc xỉ được giữ làm đối chứng riêng. Đối với nghiên cứu có thí nghiệm xâm thực, chỉ sử dụng kết quả của nhóm không chịu tác động xâm thực để phân tích sự phát triển cường độ.

Sau khi loại các hàng tiêu đề, bảng đầu vào có 312 dòng dữ liệu, trong đó 288 dòng chứa kết quả cường độ nén. Có 217 dòng đáp ứng điều kiện lựa chọn. Riêng nguồn S06, 39 kết quả từng viên mẫu được gộp thành 13 giá trị trung bình theo đúng loạt thí nghiệm, chế độ dưỡng hộ và tuổi thử. Sau bước này, tập dữ liệu còn 191 kết quả cấp phối/loạt-tuổi, gồm 136 kết quả của hệ tro bay-xỉ và 55 kết quả đối chứng nguyên chất.

Các giá trị trung bình đã được nguồn công bố được giữ nguyên; không lấy trung bình giữa các nghiên cứu. Ô thiếu thông tin không được thay bằng giá trị không. Số liệu đọc từ đồ thị được đánh dấu riêng. Trong 136 kết quả của hệ phối hợp, 49 kết quả từ S02, S04, S05, S08, S09 và S10 được ưu tiên cho phân tích chính; các nguồn còn lại được sử dụng bổ trợ do còn vấn đề về truy xuất, tính nhất quán hoặc cách xác định số liệu. Riêng S06, tỷ lệ dung dịch natri silicat (SS)/dung dịch natri hydroxit (SH) được báo cáo chưa nhất quán; do đó, chỉ dùng các nhóm cường độ xác định được điều kiện thí nghiệm để đối chiếu bổ trợ.

Bảng 1. Phạm vi dữ liệu sau lọc của các nguồn nghiên cứu

Nguồn	N hỗn hợp/ đối chứng	Tỷ lệ xỉ trong hỗn hợp (%)	Tuổi thử (ngày)	Nhiệt độ dưỡng hộ	Mẫu nén
S01. Deb, Nath và Sarker (2014) [9]	40 / 10	10–20	7–180	20°C	Trụ 100 × 200 mm
S02. Kunal và cộng sự (2026) [6]	10 / 10	10–50	7–28	Khoảng 25 - 42°C	Lập phương 150 mm
S03. Bellum và cộng sự (2020a) [5]	4 / 0	20–30	28	Không định lượng	Lập phương, kích thước chưa rõ
S04. Bellum và cộng sự (2020b) [2]	10 / 0	10–50	28	32 ± 3°C	Lập phương 150 mm
S05. Nath và Sarker (2017) [3]	6 / 4	10–15	28–90	18 - 23°C	Trụ 100 × 200 mm
S06. Patel và cộng sự (2026) [10]	13 / 0	20–60	3–56	Không định lượng	Lập phương 150 mm
S07. Gopalakrishnan và Chinnaraju (2016) [7]	30 / 6	50–90	3–180	25 ± 5°C	Lập phương 100 mm
S08. Hadi và cộng sự (2017) [4]	6 / 19	40–90	7–28	Khoảng 25°C	Trụ 100 × 200 mm
S09. Bellum và cộng sự (2019) [1]	7 / 1	10–70	28	32 ± 3°C	Lập phương 150 mm
S10. Jawahar và Mounika (2016) [11]	10 / 5	50–75.06	7–112	Không định lượng	Lập phương 150 mm

Trong bài báo ký hiệu N là số kết quả cấp phối/loạt-tuổi sau gộp, không phải số cấp phối độc lập hoặc số viên mẫu. Thuật ngữ "không định lượng" chỉ trường hợp tài liệu thu thập mô tả dưỡng hộ ở nhiệt độ môi trường nhưng chưa cung cấp giá trị cụ thể. Tỷ lệ xỉ tính theo khối lượng; mức 75% danh nghĩa của S10 tương ứng 75.061% theo khối lượng trong bảng cấp phối.

Nguồn S01 được nhận dạng theo nghiên cứu của Deb, Nath và Sarker [9]; các số đếm và điều kiện thí nghiệm trong hàng S01 được giữ theo bảng thu thập, cần đối chiếu lại toàn văn trước khi sử dụng làm bằng chứng định lượng. Với S09, nhiệt độ 32 ± 3°C được nêu trong bài gốc [1].

2.3. Quy ước thông số và nguyên tắc so sánh

Các thông số được xác định theo Bảng 2 nhằm phân biệt tỷ lệ dung dịch hoạt hóa, lượng nước và mô đun silicat. Khối lượng tiền chất được tính bằng tổng khối lượng tro bay và xỉ. Tỷ lệ SS/SH là tỷ lệ khối lượng dung dịch natri silicat và dung dịch natri hydroxit, không đồng nhất với mô đun silicat tính theo tỷ số mol SiO_2/Na_2O.

Việc so sánh ưu tiên thực hiện trong cùng nghiên cứu, giữa các cấp phối có điều kiện thí nghiệm tương đồng. Cường độ mẫu lập phương và mẫu trụ được giữ riêng, không tự quy đổi. Tỷ số cường độ theo tuổi chỉ được xác định cho cùng cấp phối, dạng mẫu và chế độ dưỡng hộ; không nội suy cường độ 28 ngày khi thiếu kết quả. Khi chưa có đầy đủ thông tin về nước trong dung dịch và độ ẩm cốt liệu, lượng nước bổ sung không được sử dụng thay cho lượng nước tổng.

Bảng 2. Định nghĩa các thông số sử dụng trong phân tích

Thông số	Công thức xác định	Lưu ý
Tỷ lệ xỉ, r_s (%)	$r_s = \frac{m_{xỉ}}{m_{FA} + m_{xỉ}} \times 100$	Tính theo khối lượng tiền chất khô.
Tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tiền chất, A/B	$\frac{A}{B} = \frac{m_{dd}}{m_{FA} + m_{xỉ}}$	Chỉ tính khi xác định được tổng khối lượng dung dịch hoạt hóa.
Tỷ lệ dung dịch silicat/hydroxit, SS/SH	$\frac{SS}{SH} = \frac{m_{SS}}{m_{SH}}$	Tỷ lệ khối lượng dung dịch, không phải mô đun silicat.
Tỷ lệ nước bổ sung/tiền chất, W_{bs}/B	$\frac{W_{bs}}{B} = \frac{m_{Wbs}}{m_{FA} + m_{xỉ}}$	Không bao gồm nước có sẵn trong dung dịch.
Tỷ số cường độ theo tuổi, R_t	$R_t = \frac{f_c(t)}{f_c(28)}$	Cùng cấp phối, dạng mẫu và chế độ dưỡng hộ.

Trong đó: m_{FA} và $m_{xỉ}$ - Khối lượng tro bay và xỉ khô; m_{dd} - Tổng khối lượng dung dịch hoạt hóa; m_{ss} và m_{SH} - khối lượng dung dịch natri silicat và dung dịch natri hydroxit; m_{Wbs} - khối lượng nước bổ sung; $f_c(t)$ và $f_c(28)$- cường độ chịu nén tại tuổi t ngày và 28 ngày, tính bằng MPa.

Các khối lượng phải sử dụng cùng đơn vị; các giá trị cường độ phải sử dụng cùng đơn vị MPa.

Đối với nguồn có kết quả từng viên mẫu, cường độ trung bình và độ lệch chuẩn mẫu được tính như sau:

Cường độ chịu nén trung bình: $\overline{f_c} = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_{c,i}}{n}$

Độ lệch chuẩn mẫu: $SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(f_{c,i} - \overline{f_c})^2}{n-1}}$

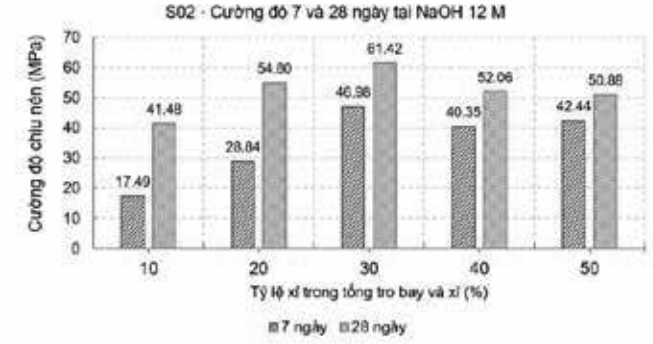
Trong đó: $f_{c,i}$ là cường độ chịu nén của viên mẫu thứ i; $\overline{f_c}$ là cường độ chịu nén trung bình của nhóm mẫu; n là số viên mẫu trong nhóm ($n \geq 2$). Cường độ chịu nén trung bình và độ lệch chuẩn mẫu có đơn vị MPa.

Các phép tính trên chỉ áp dụng cho các viên mẫu thuộc cùng một nhóm thí nghiệm, có cùng cấp phối, hình dạng và kích thước mẫu, tuổi thử và chế độ dưỡng hộ. Không tính độ lệch chuẩn khi tài liệu chỉ công bố giá trị trung bình mà không cung cấp kết quả của từng viên mẫu hoặc thông tin thống kê tương ứng.

3. CÁC YẾU TỐ CHI PHỐI SỰ PHÁT TRIỂN CƯỜNG ĐỘ

3.1. Đặc điểm tiền chất và tỷ lệ tro bay với xỉ

Đặc điểm tiền chất và tỷ lệ phối hợp tro bay-xỉ cần được xem xét đồng thời khi phân tích cường độ. Với mỗi nguồn nguyên liệu, thành phần hóa học, hàm lượng pha có khả năng phản ứng và độ mịn là những đặc trưng cần đối chiếu. Thay đổi tỷ lệ tro bay-xỉ còn làm thay đổi thành phần của hệ chất kết dính. Nghiên cứu vi cấu trúc của Ismail và cộng sự [8] cho thấy tỷ lệ phối hợp ảnh hưởng đến quá trình hình thành và đặc điểm các pha gel trong hệ hoạt hóa kiềm. Tuy nhiên, không thể xác định loại gel hoặc mức độ phản ứng chỉ từ kết quả cường độ chịu nén.



Hình 1. Cường độ chịu nén 7 và 28 ngày của S02 [6] tại NaOH 12 M

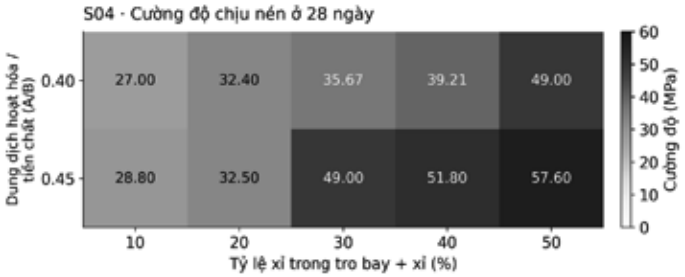
Hình 1 trình bày kết quả của S02 [6] đối với nhóm bê tông tro bay-xỉ sử dụng NaOH 12 M và dưỡng hộ môi trường. Khi tỷ lệ xỉ tăng từ 10% lên 20% và 30%, cường độ 7 ngày lần lượt đạt 17.49, 28.84 và 46.98 MPa; cường độ 28 ngày tương ứng đạt 41.48, 54.80 và 61.42 MPa. Khi tăng xỉ lên 40% và 50%, cường độ 28 ngày giảm còn 52.06 và 50.88 MPa. Như vậy, 30% xỉ cho cường độ cao nhất ở cả hai tuổi trong các mức đã khảo sát. Đây là cực đại quan sát được của chuỗi S02, chưa đủ cơ sở coi là tỷ lệ tối ưu cho các nguồn nguyên liệu khác. Nhóm chỉ sử dụng tro bay với NaOH 8-16 M được xem xét riêng vì khác phạm vi biến thí nghiệm.

Xu hướng của S02 khác với S09 [1], trong đó cường độ 28 ngày tăng từ 15.46 lên 38.24 MPa khi tỷ lệ xỉ tăng từ 0% lên 70%. Ở S04 [2], mức 50% xỉ cho cường độ cao nhất trong phạm vi khảo sát 10 - 50%, đạt 49.0 và 57.6 MPa với tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tiền chất lần lượt bằng 0.40 và 0.45. Các kết quả đối chiếu tại Bảng 3 chưa đủ cơ sở xác lập một quan hệ định lượng chung cho mọi hệ tro bay-xỉ. Vì vậy, cần lựa chọn và kiểm chứng tỷ lệ phối hợp theo nguồn tiền chất, thành phần dung dịch hoạt hóa và điều kiện chế tạo cụ thể.

3.2. Thành phần và hàm lượng chất hoạt hóa

Thành phần và hàm lượng dung dịch hoạt hóa cần được mô tả bằng các thông số riêng biệt. Nồng độ mol NaOH biểu thị số mol NaOH trong một lít dung dịch; SS/SH là tỷ lệ khối lượng dung dịch

natri silicat và dung dịch natri hydroxit; mô đun silicat đặc trưng cho tỷ số SiO_2/Na_2O, cần ghi rõ cơ sở tính và phạm vi dung dịch được xét. Trong khi đó, A/B là tỷ lệ khối lượng tổng dung dịch hoạt hóa trên tiền chất khô. Vì vậy, SS/SH không đồng nhất với mô đun silicat, còn A/B không phải tỷ lệ nước/tiền chất. Bộ dữ liệu hiện tại chưa có chuỗi biến thiên nồng độ NaOH độc lập đủ rộng cho hệ tro bay-xỉ để xác định nồng độ tối ưu chung.



Hình 2. Cường độ chịu nén 28 ngày theo tỷ lệ xỉ và A/B của S04 [2]

Hình 2 tổng hợp 10 cấp phối của S04 [2], với NaOH 8 M, SS/SH danh nghĩa 2.5 và dưỡng hộ khoảng 32 ± 3°C. Khi A/B tăng từ 0.40 lên 0.45, cường độ 28 ngày tại 10%, 20%, 30%, 40% và 50% xỉ lần lượt tăng 1.80, 0.10, 13.33, 12.59 và 8.60 MPa. Đặc biệt, tại 20% xỉ, cường độ chỉ thay đổi từ 32.40 lên 32.50 MPa, trong khi tại 30% xỉ tăng từ 35.67 lên 49.00 MPa. Mức chênh lệch không đồng đều cho thấy cần lựa chọn lượng dung dịch cùng với tỷ lệ tiền chất. Tuy nhiên, thay đổi A/B đồng thời làm thay đổi lượng kiềm, silicat và nước đưa vào hỗn hợp, nên chưa thể tách riêng đóng góp của từng thành phần. Giá trị 57.60 MPa là lớn nhất trong 10 cấp phối đã khảo sát, không đại diện cho một nghiệm tối ưu tổng quát.

S03 [5] bổ sung đối chiếu giữa dung dịch hoạt hóa pha trong phòng thí nghiệm và dung dịch thương mại. Khi sử dụng kết quả này, cần phân biệt số liệu công bố trực tiếp với giá trị đọc từ hình. Các ô NaOH hoặc silicat ghi bằng 0 trong bảng tổng hợp của hệ thương mại không đủ cơ sở kết luận lượng chất hoạt hóa bằng 0. Do khác biệt cách khai báo dung dịch và một số thông tin nguồn chưa rõ, kết quả này chỉ được dùng để đối chiếu bổ trợ; chưa sử dụng S01 để kết luận riêng về ảnh hưởng của SS/SH.

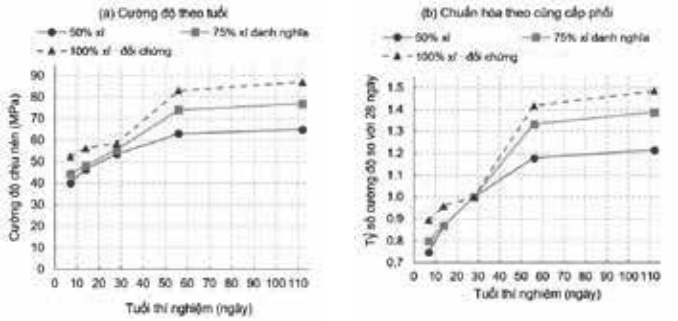
3.3. Lượng nước và điều kiện chế tạo

Khi phân tích ảnh hưởng của nước, cần tính đến nước có trong dung dịch hoạt hóa, nước bổ sung và lượng nước hiệu dụng do độ ẩm, độ hút nước của cốt liệu. Tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tiền chất (A/B) không đại diện cho tỷ lệ nước tổng/tiền chất, vì dung dịch còn chứa các chất hòa tan. Hai cấp phối có cùng A/B vẫn có thể khác lượng nước và hàm lượng kiềm khi thay đổi nồng độ NaOH, thành phần dung dịch silicat hoặc SS/SH. Vì vậy, cần xác định thành phần dung dịch và trạng thái ẩm cốt liệu trước khi đối chiếu quan hệ nước-cường độ.

Trong dữ liệu tổng hợp, S09 [1] báo cáo nước bổ sung theo mẻ, chưa đủ cơ sở quy đổi thống nhất về kg/m^3; S04 [2] chưa ghi rõ lượng nước bổ sung. Với S03 [5], việc xác định nước trong dung dịch thương mại cần thông tin về hàm lượng chất rắn. Một số cấp phối thuộc các loạt A35 và A40 của S05 [3] khác đồng thời về lượng dung dịch và nước bổ sung, nên không thể quy chênh lệch cường độ riêng cho nước. Do đó, dữ liệu hiện tại chưa đủ để xây dựng quan hệ định lượng hoặc đề xuất tỷ lệ nước tối ưu. Bên cạnh thành phần cấp phối, thời gian và điều kiện dưỡng hộ cần được xét khi đánh giá sự phát triển cường độ.

3.4. Điều kiện dưỡng hộ và tuổi thí nghiệm

Dưỡng hộ không gia nhiệt không đồng nghĩa với việc các mẫu được bảo quản ở cùng nhiệt độ, độ ẩm hoặc điều kiện giữ kín. Theo Bảng 1, nhiệt độ dưỡng hộ được báo cáo trong S05 là 18 - 23°C [3], S08 khoảng 25°C [4], còn S04 và S09 khoảng 32 ± 3°C [1, 2]; S02 báo cáo khoảng 25 - 42°C [6], trong khi một số nguồn khác chỉ mô tả dưỡng hộ môi trường mà không định lượng nhiệt độ. Do khác biệt đồng thời về nguyên liệu, cấp phối và mẫu thử, không thể suy ra ảnh hưởng riêng của nhiệt độ bằng cách so sánh cường độ giữa các nguồn. Việc đối chiếu cần ưu tiên các chuỗi thí nghiệm trong cùng nghiên cứu.



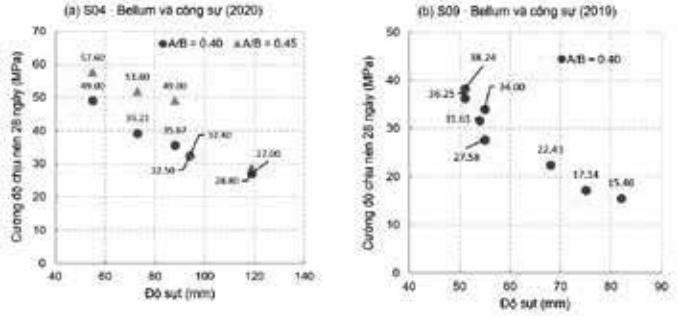
Hình 3. Phát triển cường độ theo tuổi của S10 [11]

Hình 3 trình bày sự phát triển cường độ của S10 [11] tại các tuổi 7, 14, 28, 56 và 112 ngày. Hệ 50% xỉ tăng từ 40.0 MPa ở 7 ngày lên 53.5 MPa ở 28 ngày và 65.0 MPa ở 112 ngày. Với hệ 75% xỉ danh nghĩa, các giá trị tương ứng là 44.4, 55.5 và 77.0 MPa. Tỷ số cường độ 112 ngày so với 28 ngày lần lượt đạt khoảng 1.21 và 1.39, tương đương mức tăng khoảng 21.5% và 38.7% so với tuổi 28 ngày. Như vậy, trong chuỗi khảo sát này, hệ 75% xỉ danh nghĩa có mức tăng tương đối sau 28 ngày lớn hơn hệ 50% xỉ. Hệ 100% xỉ được trình bày như đối chứng riêng.

Chuẩn hóa theo cường độ 28 ngày giúp đối chiếu mức phát triển tương đối của từng cấp phối, nhưng không biểu thị trực tiếp tốc độ phản ứng hoặc tốc độ tăng cường độ. Tỷ số cao hơn cũng không mặc nhiên đồng nghĩa với cường độ tuyệt đối cao hơn. S05 [3] cung cấp thêm kết quả ở 28 và 90 ngày để đối chiếu trong từng cấp phối. Với các nguồn có số liệu đọc từ hình hoặc thành phần dung dịch hoạt hóa chưa rõ, nhận xét cần giữ ở mức xu hướng. Không gộp kết quả sau gia nhiệt hoặc sau tác động xâm thực vào chuỗi dưỡng hộ môi trường. Vì vậy, lựa chọn cấp phối cần dựa trên cường độ tại tuổi yêu cầu và điều kiện dưỡng hộ được xác định cụ thể.

3.5. Sự đánh đổi giữa tính công tác và cường độ

Lựa chọn cấp phối bê tông geopolymer tro bay-xỉ cần đáp ứng đồng thời yêu cầu cường độ và tính công tác. Độ sụt là một chỉ tiêu đánh giá tính công tác của hỗn hợp, nhưng chưa phản ánh đầy đủ khả năng bơm, đổ, đầm và duy trì tính công tác theo thời gian. Hình 4 đối chiếu độ sụt với cường độ chịu nén 28 ngày của S04 [2] và S09 [1]. Các nguồn được trình bày trong hai ô riêng; ký hiệu phân biệt mức A/B và nhãn cạnh điểm biểu thị cường độ chịu nén.



Hình 4. Quan hệ độ sụt-cường độ chịu nén 28 ngày của S04 [2] và S09 [1]

Trong S04 [2], khi tỷ lệ xỉ tăng từ 10% lên 50% tại A/B = 0.40, cường độ tăng từ 27.0 lên 49.0 MPa, đồng thời độ sụt giảm từ 119 xuống 55 mm. Tại A/B = 0.45, các giá trị tương ứng là 28.8 - 57.6 MPa và 132 - 68 mm. So sánh tại cùng tỷ lệ xỉ cho thấy tăng A/B từ 0.40

lên 0.45 đi kèm độ sụt lớn hơn ở cả năm mức khảo sát, trong khi mức tăng cường độ không đồng đều. Như vậy, lượng dung dịch hoạt hóa cần được lựa chọn cùng tỷ lệ tiền chất để cân bằng hai yêu cầu.

S09 [1] cũng ghi nhận xu hướng tổng thể cường độ tăng và độ sụt giảm khi tăng xỉ: từ hệ chỉ có tro bay đến hệ 70% xỉ, cường độ tăng từ 15.46 lên 38.24 MPa, còn độ sụt giảm từ 82 xuống 51 mm. Tuy nhiên, độ sụt không giảm đơn điệu tại mọi mức xỉ. Các điểm này thể hiện sự biến đổi đồng thời của hai chỉ tiêu khi thay đổi cấp phối, chưa chứng minh độ sụt là nguyên nhân trực tiếp làm thay đổi cường độ. Vì vậy, không xây dựng một đường hồi quy chung cho hai nguồn. Cấp phối có cường độ lớn nhất chỉ phù hợp khi đồng thời đáp ứng yêu cầu thi công; miền lựa chọn cần được xác định theo cả cường độ tại tuổi yêu cầu và tính công tác phù hợp.

4. THẢO LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG LỰA CHỌN CẤP PHỐI

Bảng 3 tổng hợp các phép so sánh trong từng loạt thí nghiệm. S09 [1] và S04 [2] ghi nhận cường độ tăng theo tỷ lệ xỉ trong phạm vi khảo sát, trong khi S02 [6] đạt giá trị lớn nhất tại 30% xỉ. S05 [3] bổ sung đối chiếu với hệ chỉ chứa tro bay; S10 [11] cho thấy cường độ tiếp tục phát triển sau 28 ngày. Các kết quả cho thấy cần xét đồng thời tỷ lệ tiền chất, lượng dung dịch hoạt hóa và tuổi thử.

Mức tăng cường độ tương đối phụ thuộc giá trị ban đầu và khoảng biến thiên thông số, nên không dùng để xếp hạng hiệu quả giữa các nghiên cứu. Những phép so sánh bắt đầu từ 0% xỉ bao gồm hệ đối chứng chỉ chứa tro bay, cần phân biệt với so sánh giữa các hệ phối hợp. Kết quả của một loạt thí nghiệm chưa đủ để xác lập tỷ lệ tối ưu chung.

Bảng 3. So sánh định lượng trong các loạt thí nghiệm

Nguồn và phép so sánh	Mức thông số	Cường độ (MPa)	Thay đổi (%)
S09 [1] Tỷ lệ xỉ (%)	0 → 70	15.46 → 38.24	+147.3
S04 [2] Xỉ (%) tại A/B = 0.40	10 → 50	27.00 → 49.00	+81.5
S04 [2] Xỉ (%) tại A/B = 0.45	10 → 50	28.80 → 57.60	+100.0
S02 [6] Xỉ (%) tại NaOH 12 M	10 → 30	41.48 → 61.42	+48.1
S05 [3] Xỉ (%) tại A/B = 0.40	0 → 15	25.60 → 46.60	+82.0
S04 [2] A/B tại 30% xỉ	0.40 → 0.45	35.67 → 49.00	+37.4
S04 [2] A/B tại 50% xỉ	0.40 → 0.45	49.00 → 57.60	+17.6
S10 [11] Tuổi (ngày), 50% xỉ	7 → 112	40.00 → 65.00	+62.5

Khả năng kế thừa kết quả phụ thuộc mức độ tương đồng về tiền chất, dung dịch hoạt hóa và điều kiện chế tạo. Trong tập dữ liệu, lượng nước, nhiệt độ dưỡng hộ và thành phần dung dịch chưa được báo cáo đồng nhất; một số giá trị được đọc từ đồ thị [1, 2, 5]. Vì vậy, cần phân biệt số liệu công bố trực tiếp với số liệu số hóa, không thay thông tin thiếu bằng giá trị không hoặc suy ra độ lệch chuẩn khi nguồn chỉ báo cáo giá trị trung bình. Khác biệt về mẫu thử và dưỡng hộ cũng hạn chế khả năng gộp dữ liệu giữa các nguồn.

Trên cơ sở đó, trình tự lựa chọn cấp phối được đề xuất gồm: xác định cường độ tại tuổi yêu cầu và tính công tác phù hợp biện pháp thi công; đặc trưng thành phần hóa học, độ mịn và độ ổn định của tiền chất; chọn khoảng tỷ lệ tro bay–xỉ từ nghiên cứu có điều kiện tương đồng. Các tỷ lệ 30%, 50% hoặc 70% xỉ cần được kiểm chứng với từng nguồn vật liệu [1, 2, 3, 6]. Tiếp theo, xác định thành phần dung dịch, nồng độ NaOH, tỷ lệ dung dịch natri silicat/NaOH, A/B và lượng nước; chế tạo cấp phối thử để đánh giá đồng thời độ sụt, khả năng duy trì tính công tác và cường độ. Cuối cùng, hiệu chỉnh và thí nghiệm lặp để xác nhận kết quả, đồng thời kiểm tra lại khi thay đổi nguyên liệu hoặc dung dịch thương mại. Đây là trình tự đề xuất từ tổng hợp tài liệu; dữ liệu hiện có chưa đủ để xác lập cấp phối định lượng chung cho từng mức cường độ.

5. KẾT LUẬN

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy cường độ bê tông geopolymer tro bay-xỉ dưỡng hộ không gia nhiệt phụ thuộc đồng thời vào đặc điểm tiền chất, tỷ lệ xỉ, dung dịch hoạt hóa, tuổi thử và điều kiện dưỡng hộ. Tỷ lệ xỉ cho cường độ cao nhất khác nhau giữa các nghiên cứu, chưa cho phép xác lập giá trị tối ưu chung. Ảnh hưởng của lượng dung dịch hoạt hóa cần được xét cùng tỷ lệ tiền chất, do lượng kiềm, silicat và nước cùng thay đổi. Cường độ tiếp tục phát triển sau 28 ngày trong các cấp phối khảo sát; tăng xỉ thường đi kèm giảm độ sụt. Vì vậy, cấp phối cần đáp ứng đồng thời cường độ và tính công tác, được hiệu chỉnh và kiểm chứng bằng thí nghiệm theo nguyên liệu, điều kiện dưỡng hộ và yêu cầu thi công thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. R. Bellum, K. Muniraj, S. R. C. Madduru. Empirical relationships on mechanical properties of Class-F fly ash and GGBS based geopolymer concrete. Annales de Chimie - Science des Matériaux, vol. 43, no. 3, pp. 189-197, 2019, doi: 10.18280/acsm.430308.

[2] R. R. Bellum, K. Muniraj, S. R. C. Madduru. Influence of slag on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete. Journal of the Korean Ceramic Society, vol. 57, no. 5, pp. 530-545, 2020, doi: 10.1007/s43207-020-00056-7.

[3] P. Nath, P. K. Sarker. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. Construction and Building Materials, vol. 130, pp. 22-31, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034.

[4] M. N. S. Hadi, N. A. Farhan, M. N. Sheikh. Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. Construction and Building Materials, vol. 140, pp. 424-431, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131.

[5] R. R. Bellum, K. Muniraj, S. R. C. Madduru. Influence of activator solution on microstructural and mechanical properties of geopolymer concrete. Materialia, vol. 10, Art. no. 100659, 2020, doi: 10.1016/j.mtla.2020.100659.

[6] R. Kunal, J. Sharma, I. Tank. Fresh and mechanical properties of fly ash-GGBS based geopolymer concrete: Effect of NaOH molarity, slag content and curing condition. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, vol. 14, no. 7, pp. 1894-1903, 2026, doi: 10.22214/ijraset.2026.84364.

[7] R. Gopalakrishnan, K. Chinnaraju. Durability of alumina silicate concrete based on slag/fly-ash blends against acid and chloride environments. Materiali in tehnologije, vol. 50, no. 6, pp. 929-937, 2016, doi: 10.17222/mit.2015.230.

[8] I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan, J. S. J. van Deventer. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. Cement and Concrete Composites, vol. 45, pp. 125-135, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006.

[9] P. S. Deb, P. Nath, P. K. Sarker. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. Materials & Design, vol. 62, pp. 32-39, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.001.

[10] M. K. Patel, A. P. Singh, R. R. L. Birali. Effect of mix proportion and curing conditions on compressive strength of geopolymer concrete. International Journal of Creative and Open Research in Engineering and Management, vol. 2, no. 4, pp. 1-23, 2026, doi: 10.55041/ijcope.v2i4.650.

[11] J. G. Jawahar, G. Mounika. Strength properties of fly ash and GGBS based geo polymer concrete. Asian Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 1, pp. 127-135, 2016.

■Ngày nhận bài: 04/9/2026 ■Ngày sửa bài: 11/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/9/2026

Tích hợp AI và mô hình hệ thống động đánh giá tác động của quy hoạch nhà cao tầng đến giao thông đô thị

Integrating Artificial Intelligence and System dynamics to assess the impacts of High-Rise development planning on urban traffic

> TRẦN ĐẶNG NGỌC KHUÊ, PGS.TS NGUYỄN VĂN TIẾP*
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP Hồ Chí Minh
*Email: tiepnv@hcmute.edu.vnepnv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Đô thị hóa nhanh và phát triển nhà cao tầng tại các đô thị lớn của Việt Nam đang đòi hỏi những cách tiếp cận mới nhằm nâng cao độ tin cậy so với các phương pháp truyền thống. Nghiên cứu thực hiện một tổng quan phạm vi về việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và mô hình hệ thống động (System Dynamics - SD) trong đánh giá tác động của quy hoạch nhà cao tầng đến giao thông nội đô. Nhóm tác giả đề xuất một khung phương pháp bốn phân hệ kho - dòng, trong đó AI/học máy hỗ trợ ước lượng tham số. Khung phương pháp được minh họa qua nghiên cứu điển hình tại vùng TOD bán kính 1 km quanh Ngã tư Thủ Đức, TP.HCM, giai đoạn 2025 - 2035. Kết quả cho thấy nếu hệ số sử dụng đất (FSI) mục tiêu được đẩy đến trần quy định TOD (1,5 lần), V/C có thể vượt ngưỡng cảnh báo 0,85 vào khoảng năm 2031 và đạt khoảng 1,05 vào năm 2035 với hạ tầng hiện trạng. Tuy nhiên, nếu kết hợp với dự án mở rộng tuyến đường đang triển khai, V/C chỉ còn khoảng 0,66. Điều này cho thấy dư địa tăng FSI theo TOD chỉ khả thi về giao thông nếu đồng bộ với tiến độ mở rộng hạ tầng.

Từ khóa: Hệ thống động; trí tuệ nhân tạo; quy hoạch nhà cao tầng; giao thông đô thị; tổng quan phạm vi; TP.HCM.

ABSTRACT

Rapid urbanization and high-rise development in Vietnam's major cities call for new approaches that improve on the reliability of traditional methods. This study conducts a scoping review on integrating artificial intelligence and system dynamics (SD) modeling to assess the traffic impact of high-rise development. The authors propose a four-subsystem stock-flow framework in which AI/machine learning supports parameter estimation. The framework is illustrated through a case study of the 1-km TOD radius around the Ngã Tư Thủ Đức intersection, Ho Chi Minh City, over 2025-2035. Results show that if the target floor space index (FSI) is pushed to the TOD regulatory ceiling (1.5×), the volume-to-capacity ratio (V/C) could exceed the 0.85 warning threshold by around 2031 and reach about 1.05 by 2035 under existing infrastructure. However, when combined with the ongoing road-widening project, V/C drops to about 0.66. This indicates that the FSI increase allowed under TOD policy is only traffic-feasible if synchronized with infrastructure expansion.

Keywords: System dynamics; artificial intelligence; high-rise development; urban traffic; scoping review; Ho Chi Minh City.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và xu hướng phát triển công trình cao tầng tại TP.HCM ngày càng mạnh, tình trạng quá tải hạ tầng giao thông nội đô đang trở thành thách thức nghiêm trọng, thể hiện qua ùn tắc kéo dài, suy giảm chất lượng môi trường và gia tăng chi phí xã hội. Thành phố đã ban hành các quy định kiểm soát hệ số sử dụng đất (FSI) và định hướng phát triển đô thị theo mô hình giao thông công cộng (TOD), song việc thiếu công cụ định lượng động để đánh giá tác động của quy hoạch cao tầng đến năng lực hạ tầng giao thông hiện hữu khiến công tác điều tiết quy hoạch còn mang tính định tính và phản ứng chậm so với tốc độ phát triển thực tế.

Các phương pháp đánh giá tác động giao thông truyền thống, dựa trên hệ số phát sinh chuyến đi cố định và ngoại suy tuyến tính, khó phản ánh được vòng phản hồi phức tạp giữa phát triển không gian, dân cư, phương tiện và tải hạ tầng, trong đó nổi bật là độ trễ giữa thời điểm cấp phép/bàn giao công trình và thời điểm dân cư lấp đầy, cũng như hiện tượng nhu cầu cảm ứng khi năng lực hạ tầng được mở rộng. Việc tích hợp mô hình hệ thống động (System Dynamics - SD), vốn mạnh về mô tả cấu trúc nhân - quả và vòng

phản hồi, với trí tuệ nhân tạo (AI), vốn mạnh về ước lượng tham số và dự báo từ dữ liệu, mở ra khả năng lượng hóa, mô phỏng và dự báo chính xác hơn mối quan hệ giữa tăng tầng cao, mật độ dân cư và quá tải giao thông.

Nghiên cứu xác định ba mục tiêu: (i) thực hiện một tổng quan phạm vi (scoping review) về các nghiên cứu quốc tế và trong nước liên quan đến việc tích hợp AI và SD trong đánh giá tác động quy hoạch đô thị đến giao thông; (ii) xác định các khoảng trống nghiên cứu làm cơ sở cho đề tài; (iii) minh họa khả năng áp dụng khung phương pháp này thông qua một mô hình bốn phân hệ kho - dòng cho vùng phát triển theo định hướng giao thông công cộng (TOD) bán kính 1 km quanh nút giao Ngã tư Thủ Đức (TP.HCM), sử dụng số liệu thứ cấp có trích dẫn kết hợp một số giả định còn lại, như bước chuẩn bị trước khi triển khai đếm xe và khảo sát hộ ở giai đoạn tiếp theo của đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên.

2. LƯỢC SỬ NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu thực hiện tổng quan theo khung scoping review của Arksey và O'Malley [1], có tham chiếu hướng dẫn báo cáo PRISMA-ScR [2]. Tài liệu được tìm kiếm trên Google Scholar, ScienceDirect và Hệ thống tạp chí khoa học Việt Nam (VJOL) trong giai đoạn 2015 - 2025, với các nhóm từ khóa "system dynamics" kết hợp "urban traffic"/"urban planning"; "machine learning"/"deep reinforcement learning" kết hợp "traffic"; "floor area ratio"/"floor space index" kết hợp "infrastructure"/"congestion"; cùng các từ khóa tiếng Việt tương ứng (hệ thống động, quy hoạch cao tầng, TOD, hệ số sử dụng đất). Tiêu chí chọn là các công trình có mô hình hóa định lượng hoặc phân tích chính sách liên quan trực tiếp đến quan hệ quy hoạch - dân số - phương tiện - giao thông. Do khuôn khổ một bài báo ngắn, tổng quan mang tính minh họa cho các dòng nghiên cứu chính hơn là một rà soát hệ thống đầy đủ theo đúng quy trình PRISMA-ScR.

2.1. Hệ thống động trong mô phỏng đô thị và giao thông

Các tổng quan quốc tế gần đây khẳng định SD đã trở thành khung mô hình phổ biến để mô phỏng động các vòng phản hồi đô thị từ phát triển không gian, dân cư, nhu cầu đi lại đến tắc nghẽn và điều chỉnh chính sách nhưng còn hạn chế ở mức độ ràng buộc bởi dữ liệu và kết nối với dữ liệu thời gian thực hay bộ chỉ số hiệu năng đô thị [3]. Trong lĩnh vực giao thông - phát thải, các mô hình SD gần đây nhấn mạnh vòng lặp tiêu cực giữa tắc nghẽn, tiêu hao nhiên liệu và ô nhiễm, đồng thời cho thấy các chính sách đơn tuyến kém hiệu quả hơn các gói giải pháp phối hợp giữa kiểm soát phương tiện, tín hiệu ưu tiên và quy hoạch sử dụng đất [4]. Một hướng khác tiếp cận đồng tối ưu giữa kiểm soát ô nhiễm giao thông và mục tiêu giảm phát thải carbon, cho thấy SD phù hợp để đánh giá đánh đổi giữa các mục tiêu chính sách theo thời gian [5]. Điểm chung là SD được dùng như công cụ mô tả cấu trúc nhân - quả (kho - dòng, vòng phản hồi) hơn là công cụ dự báo điểm chính xác tuyệt đối - phù hợp với mục tiêu xác định ngưỡng kịch bản quy hoạch.

2.2. Trí tuệ nhân tạo và học máy trong dự báo, điều khiển giao thông

Song song với SD, các tổng quan 2024 - 2025 ghi nhận học máy/học sâu cải thiện rõ rệt độ chính xác dự báo lưu lượng, tốc độ và phát hiện tắc nghẽn, đặc biệt khi khai thác dữ liệu đa nguồn từ cảm biến, camera, viễn thông và bản đồ số [6]. Ở lớp điều khiển, học tăng cường sâu (DRL) cho điều khiển đèn tín hiệu đạt kết quả vượt trội so với luật cố định truyền thống trong môi trường mô phỏng đô thị [7]. Tuy nhiên, phần lớn công trình AI/ML nói trên tách rời khỏi cấu trúc nhân - quả dài hạn của hệ thống đô thị (quan hệ dân số - quy hoạch - phương tiện), khiến việc tích hợp mục tiêu hoạch định theo kịch bản dài hạn trở nên khó khăn. Đây là khoảng trống mà cấu trúc SD có thể bổ khuyết, trong khi AI/ML có thể đóng vai trò ước lượng tham số và làm hàm thay thế cho các quan hệ phi tuyến trong mô hình SD.

2.3. Quy hoạch cao tầng, hệ số sử dụng đất (FSI) và hạ tầng

Mối quan hệ giữa FSI và hạ tầng đô thị đã được nghiên cứu ở một số đô thị châu Á có bối cảnh tương đồng. Tại Hyderabad (Ấn Độ), một nghiên cứu định lượng cho thấy việc nới lỏng FSI mà không đi kèm đầu tư hạ tầng tương ứng gây quá tải hệ thống cấp thoát nước và giao thông tại các khu vực mật độ cao [8], trong khi một phân tích thể chế đồng thời chỉ ra "độ trễ thể chế" giữa tốc độ điều chỉnh quy định FSI và năng lực thực tế của hạ tầng, vốn phản ứng chậm hơn nhiều so với tốc độ cấp phép xây dựng [9]. Cả hai nghiên cứu này dùng phương pháp thống kê - chính sách mô tả hơn là mô hình động định lượng, nên chưa trả lời được câu hỏi "ngưỡng FSI bao nhiêu là vừa sức hạ tầng hiện hữu" theo thời gian - một câu hỏi mà cấu trúc kho - dòng của SD có ưu thế tự nhiên để trả lời thông qua phân tích kịch bản. Tương tự, một nghiên cứu ứng dụng SD để đánh giá lợi ích kinh tế - xã hội của hạ tầng cho thấy tiềm năng mở rộng khung SD sang bài toán đánh giá chính sách quy hoạch [10].

2.4. Nghiên cứu trong nước: Hệ thống động, TOD và kiểm soát phát triển cao tầng

Ở Việt Nam, SD đã được vận dụng trong quản lý rủi ro các dự án giao thông quy mô lớn, nhấn mạnh khả năng mô hình hóa vòng phản hồi chi phí - tiến độ - chất lượng và đánh giá chính sách theo kịch bản [11]. Một số công trình trên hệ thống tạp chí trong nước tiếp tục triển khai khung SD để lượng hóa tác động của nhân tố rủi ro và đề xuất cấu phần mô hình phục vụ ra quyết định [12]. Dù chưa đi trực tiếp vào chủ đề tác động quy hoạch cao tầng lên giao thông, các kết quả này tạo nền tảng phương pháp luận cho việc xây dựng cấu trúc stock - flow giao thông ở cấp quận/phường.

Về chính sách quy hoạch, TP.HCM đang thúc đẩy phát triển theo định hướng giao thông công cộng (TOD) và tích hợp quy hoạch không gian - giao thông; các hội thảo và ấn phẩm chuyên ngành gần đây nhấn mạnh nhu cầu chuyển dịch mô hình sử dụng đất quanh nhà ga, cùng công cụ dự báo nhu cầu vận tải ở khu vực ga [13]. Các cơ quan chuyên môn cũng đã ban hành hoặc đề xuất nguyên tắc kiểm soát phát triển cao tầng theo hướng đồng bộ hạ tầng kỹ thuật - xã hội [14], và một số đánh giá tổng thể chỉ ra khoảng cách giữa quy hoạch và phát triển thực tế tại Thành phố [15]. Bài toán "ngưỡng tầng cao bao nhiêu là vừa sức hạ tầng hiện hữu" vẫn thiếu công cụ định lượng động ở cấp phường/quận. Các tổng thuật chính sách trong nước cũng ghi nhận chi phí ùn tắc và quá tải hạ tầng ở mức đáng kể, nhấn mạnh nhu cầu về mô hình minh bạch, dựa trên dữ liệu địa phương để phục vụ đối thoại chính sách [16].

2.5. Khoảng trống nghiên cứu

Tổng hợp các dòng nghiên cứu trên cho thấy ba khoảng trống liên kết nhau: (i) các mô hình SD đô thị quốc tế mạnh về cấu trúc nhân - quả nhưng ít ràng buộc bởi dữ liệu địa phương và hiếm khi nhắm trực tiếp vào biến quy hoạch cao tầng; (ii) các công cụ AI/ML mạnh về dự báo ngắn hạn nhưng thiếu khung nhân - quả dài hạn để mô phỏng kịch bản quy hoạch; (iii) nghiên cứu trong nước về SD và TOD còn ở mức khung định hướng - chính sách, chưa có mô hình tích hợp AI và SD ràng buộc dữ liệu để mô phỏng kịch bản tăng tầng cao và lượng hóa tác động lên các chỉ số hiệu năng giao thông tại một hành lang cụ thể của TP.HCM. Đây là cơ sở để nhóm nghiên cứu đề xuất khung phương pháp và tình huống minh họa ở các phần tiếp theo.

3. ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP

Nghiên cứu sử dụng cách tiếp cận hệ thống - kịch bản, kết hợp SD làm khung cấu trúc nhân - quả và AI/học máy làm công cụ ước lượng tham số, theo bốn bước: (1) xác định biên hệ thống và vòng phản hồi chính; (2) xây dựng cấu trúc kho - dòng; (3) hiệu chuẩn mô hình theo chuỗi số liệu quan trắc; và phân tích độ nhạy, kịch bản.

Cấu trúc mô hình gồm bốn phân hệ liên kết tuần tự và một vòng phản hồi cân bằng (Bảng 1). Phân hệ 1 chuyển chỉ tiêu quy hoạch FSI thành diện tích sàn thực tế theo cấu trúc "đuổi mục tiêu". Phân hệ 2 chuyển diện tích sàn thành sức chứa dân cư và mô phỏng độ trễ lấp đầy, qua hai dòng vào: nhập cư ròng và tăng tự nhiên (tăng trưởng cấp số nhân). Phân hệ 3 mô phỏng quá trình cơ giới hóa tiệm cận mức bão hòa, phản ánh việc lưu lượng xe tăng nhanh hơn dân số do chuyển dịch từ xe máy sang ô tô. Phân hệ 4 là một chuỗi biến phụ không có kho, chuyển đổi dân số và mức sở hữu phương tiện thành lưu lượng quy đổi xe con (PCU) theo TCVN 4054:2005 [17], so với năng lực thông hành để tính tỷ số V/C, sau đó áp dụng hàm trễ BPR để suy ra tốc độ và thời gian hành trình.

Bảng 1. Cấu trúc bốn phân hệ của mô hình hệ thống động

Phân hệ	Cấu trúc chính	Biến trung tâm	Vai trò trong mô hình
1. Sàn ở cao tầng	1 kho + 2 dòng (đuổi mục tiêu)	FSI mục tiêu → Sàn ở cao tầng	Chuyển quyết định quy hoạch thành diện tích sàn thực tế
2. Dân số khu vực	1 kho + 2 dòng vào	Sức chứa dân cư → Dân số	Mô phỏng độ trễ lấp đầy dân cư sau khi bàn giao nhà
3. Sở hữu ô tô	1 kho + 1 dòng (tiệm cận)	Mức bão hòa ô tô	Mô phỏng cơ giới hóa: chuyển dịch xe máy → ô tô
4. Chuyển đổi ra V/C	Chuỗi biến phụ (không kho)	Lưu lượng Q; V/C; tốc độ	Quy đổi dân số/phương tiện thành mức phục vụ đường (hàm BPR)
Vòng B1	Phản hồi cân bằng, đi qua kho Dân số	V/C → Hệ số hấp dẫn nhập cư	Khu tắc đường làm chậm tốc độ nhập cư (bảng tra phi tuyến)

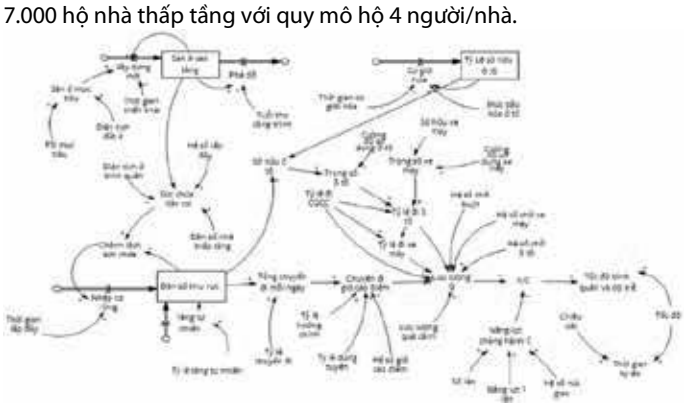
Vòng phản hồi cân bằng B1 nối Phân hệ 4 trở lại Phân hệ 2: khi V/C vượt ngưỡng, hệ số hấp dẫn nhập cư giảm theo một bảng tra phi tuyến, làm chậm tốc độ nhập cư ròng - cơ chế phản ánh việc khu vực tắc đường trở nên kém hấp dẫn với người chuyển đến. Vai trò của AI/học máy trong khung phương pháp gồm hai chức năng: ước lượng các tham số khó đo trực tiếp (hệ số của hàm BPR, thời gian cơ giới hóa) bằng hồi quy hoặc các thuật toán học máy (Random Forest, XGBoost) trên chuỗi số liệu quan trắc nhiều năm; và đóng vai trò hàm thay thế cho quan hệ phi tuyến giữa mật độ phương tiện và tốc độ khi cần suy luận nhanh trong không gian kịch bản rộng.

4. NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

4.1. Xác định vùng nghiên cứu và thông số đầu vào

Vùng nghiên cứu là hình tròn bán kính 1.000 m quanh nút giao Xa lộ Hà Nội - Võ Văn Ngân - Lê Văn Việt (Ngã tư Thủ Đức), trùng với bán kính khu vực TOD chính thức mà TP.HCM quy định quanh các nhà ga tuyến Metro số 1 theo nghị quyết của Hội đồng nhân dân Thành phố có hiệu lực từ 28/8/2025 (ga Ngã tư Thủ Đức nằm ngay tại nút giao này); trong phạm vi này, hệ số sử dụng đất được phép điều chỉnh tăng tối đa 1,5 lần so với quy định hiện hành [18]. Diện tích vùng nghiên cứu là 3,14 km² ($\pi \times 1.000^2$).

Vùng nghiên cứu nằm trọn trong phường Thủ Đức - đơn vị hành chính mới hình thành từ việc sáp nhập năm phường Bình Thọ, Linh Chiểu, Trường Thọ, Linh Tây, Linh Đông vào tháng 7/2025 - có diện tích 8,81 km², dân số 118.952 người, mật độ 13.502 người/km² [19]. Giả định mật độ dân cư phân bố tương đối đồng đều trong phường (một giả định cần kiểm chứng lại bằng bản đồ dân cư chi tiết hơn), dân số vùng nghiên cứu bán kính 1 km được ước tính khoảng 42.400 người. Trong bán kính nghiên cứu, bốn dự án chung cư đã hoàn thành được xác định từ dữ liệu bất động sản công khai: Avatar Thủ Đức (2.366 căn, 6 block, 28-33 tầng), Lavita Charm (939 căn), Lavita Garden (648 căn, 2 block, 21 tầng) và Centum Wealth Complex (554 căn, 3 block, 18 - 20 tầng), tổng cộng 4.507 căn hộ [20]. Với diện tích trung bình khoảng 65 m² mỗi căn, diện tích sàn ở cao tầng ban đầu ước tính khoảng 293.000 m², tương ứng FSI hiện trạng (tính riêng phần cao tầng) khoảng 0,23 - thấp hơn nhiều so với mức trần 1,5 lần theo quy định TOD, cho thấy dư địa phát triển cao tầng theo chính sách hiện hành còn khá lớn. Dân cư ngoài các chung cư nêu trên (ước tính bằng cách trừ dân số bốn dự án theo quy mô hộ trung bình chung cư 3,2 người/căn) là khoảng 28.000 người, tương ứng khoảng 7.000 hộ nhà thấp tầng với quy mô hộ 4 người/nhà.



Hình 1. Mô phỏng tác động theo hệ thống động SD

Tỷ lệ sở hữu phương tiện cá nhân được lấy theo số liệu toàn Thành phố cuối năm 2023 do thiếu số liệu đăng ký xe theo phường: khoảng 75 ô tô và 809 xe máy trên 1.000 dân (tương ứng 700.000 ô tô và hơn 7,6 triệu xe máy trên 9,4 triệu dân) [21]. Về hạ tầng, đoạn Xa lộ Hà Nội qua nút giao hiện có khoảng 10 làn xe (mặt cắt ngang khoảng 113 m, theo dự án BOT hoàn thành giai đoạn 2010 - 2013) và đang được đầu tư mở rộng lên 12 - 16 làn (mặt cắt 113 - 153 m) trong dự án cải tạo đoạn cầu Sài Gòn - nút giao Tân Vạn, dự kiến hoàn thành năm 2027 [22].

Bảng 2. Thông số đầu vào cập nhật cho vùng TOD bán kính 1 km quanh Ngã tư Thủ Đức

Thông số	Giá trị cập nhật	Nguồn / căn cứ
Diện tích vùng nghiên cứu (bán kính 1 km)	3,14 km^2 (3.141.593 m^2)	Bán kính TOD 1.000 m quanh ga metro theo quy định TP.HCM [18]
Dân số vùng nghiên cứu (2025)	≈ 42.400 người	Suy từ mật độ phường Thủ Đức mới 13.502 người/km^2 × 3,14 km^2 [19]
Số chung cư cao tầng đã xác định	4 dự án, 4.507 căn (Avatar Thủ Đức, Lavita Charm, Lavita Garden, Centum Wealth)	Tổng hợp dữ liệu bất động sản công khai [20]; là cận dưới, cần đối chiếu hồ sơ cấp phép
Sàn ở cao tầng ban đầu	≈ 293.000 m^2 (4.507 căn × ~65 m^2/căn)	Tính từ số căn hộ nêu trên
FSI hiện trạng (riêng phần cao tầng)	≈ 0,23	Sàn ở cao tầng / Diện tích đất ở
Số nhà thấp tầng ước tính	≈ 7.000 nhà	(Dân số - dân số 4 chung cư) / 4 người-hộ
Tỷ lệ sở hữu ô tô	75 xe/1.000 dân	TP.HCM cuối 2023: 700.000 ô tô / 9,4 triệu dân [21]
Tỷ lệ sở hữu xe máy	809 xe/1.000 dân	TP.HCM cuối 2023: 7,6 triệu xe máy / 9,4 triệu dân [21]
Số làn xe hiện trạng (Xa lộ Hà Nội qua nút giao)	≈ 10 làn (mặt cắt ~113 m)	Mô tả phổ biến hiện trạng sau BOT 2010-2013; đang mở rộng lên 12 - 16 làn, dự kiến xong 2027 [22]
Chiều dài tuyến phân tích	2 km (đường kính vùng TOD)	Suy từ bán kính nghiên cứu
FSI tối đa cho phép trong khu TOD	Tăng tối đa 1,5 lần so với quy định hiện hành	Quy định TOD của TP.HCM [18]

Bảng 3. Kết quả mô phỏng giai đoạn 2025 - 2035 theo kịch bản

Kịch bản	FSI mục tiêu	Số làn	FSI đạt 2035	Dân số 2035 (người)	V/C 2025	V/C 2035	Tốc độ 2035 (km/h)
KB0 - FSI mục tiêu 0,23 (kịch bản nền)	0,23	10	0,42	49.532	0,64	0,63	44,5
KB1 - FSI mục tiêu 0,60	0,60	10	0,52	56.755	0,64	0,68	42,7
KB2 - FSI mục tiêu 1,00	1,00	10	0,80	78.584	0,64	0,845	35,5
KB3 - FSI mục tiêu 1,50 (trần TOD)	1,50	10	1,14	105.871	0,64	1,05	25,3
KB4 - FSI mục tiêu 1,50 + mở rộng 16 làn	1,50	16	1,14	105.871	0,40	0,66	43,5

4.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Với bộ tham số cập nhật, năm gốc 2025 cho lưu lượng giờ cao điểm quy đổi xe con khoảng 8.215 xcqđ/h trên năng lực thông hành 12.750 xcqđ/h (10 làn hiện trạng), tương ứng V/C ≈ 0,64 - dưới ngưỡng cảnh báo 0,85 nhưng đã ở mức tương đối cao, với tốc độ lưu thông bình quân theo hàm trễ BPR khoảng 43,9 km/h (so với tốc độ tự do giả định 50 km/h). Trong lưu lượng giờ cao điểm năm gốc, lưu lượng quá cảnh liên vùng (3.200 xcqđ/h, lấy theo giả định ban đầu) chiếm gần 40%, phần còn lại phát sinh từ dân cư tại chỗ.

Bảng 3 tổng hợp kết quả mô phỏng giai đoạn 2025 - 2035 cho năm kịch bản: bốn kịch bản tăng FSI mục tiêu (KB0-KB3) trong điều kiện giữ nguyên năng lực thông hành 10 làn, và một kịch bản đối chiếu (KB4) giữ FSI mục tiêu ở mức trần TOD nhưng đưa năng lực thông hành lên 16 làn theo đúng tiến độ mở rộng Xa lộ Hà Nội dự kiến hoàn thành năm 2027 đã nêu ở mục 4.1.

Ở KB1 (FSI 0,60), dân số tăng chậm và V/C chỉ đạt 0,68 vào năm 2035 - vẫn trong ngưỡng an toàn. KB2 (FSI 1,00) cho thấy V/C tăng đều đặn qua các năm và tiệm cận ngưỡng cảnh báo, đạt 0,845 vào năm 2035 - sát nhưng chưa vượt 0,85. Ở KB3 (FSI 1,50 - trần theo quy định TOD), với tốc độ tăng dân số nhanh nhất trong các kịch bản, V/C vượt ngưỡng cảnh báo 0,85 vào khoảng năm 2031 và tiếp tục tăng đến 1,05 vào năm 2035 (lưu lượng vượt năng lực thông hành), kéo tốc độ lưu thông bình quân giảm mạnh từ 43,9 km/h (2025) xuống còn 25,3 km/h (2035) - mức ùn tắc đáng kể. Riêng KB4 mô phỏng cùng một kịch bản dân số và nhu cầu đi lại như KB3 (FSI mục tiêu giữ ở trần 1,5), nhưng với năng lực thông hành tăng lên 20.400 xcqđ/h (16 làn). Kết quả cho thấy V/C năm 2035 giảm còn 0,66 - thấp hơn cả V/C năm 2025 của các kịch bản 10 làn - và tốc độ lưu thông duy trì ở mức cao, khoảng 43,5 km/h, gần với tốc độ tự do.

Như vậy, áp lực dân số từ phát triển cao tầng trong bán kính TOD 1 km hoàn toàn có khả năng đẩy V/C vượt ngưỡng cảnh báo nếu FSI mục tiêu được đẩy đến trần quy định (1,5) mà không đi kèm mở rộng hạ tầng: ngưỡng phân giới nằm trong khoảng FSI mục tiêu 1,00 - 1,50, với thời điểm vượt ngưỡng ước tính vào khoảng năm 2031 ở kịch bản trần. Điều này hàm ý một thông điệp chính sách cụ thể: dư địa tăng FSI theo quy định TOD (đến 1,5 lần so với hiện hành) chỉ khả thi về mặt giao thông nếu được đồng bộ với tiến độ mở rộng Xa lộ Hà Nội lên 16 làn; nếu tốc độ lấp đầy dân cư vượt trước tiến độ mở rộng hạ tầng (dự kiến hoàn thành năm 2027), khu vực nút giao Ngã tư Thủ Đức có nguy cơ vượt ngưỡng V/C 0,85 trước năm 2035.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tập trung trình bày tổng quan phạm vi về việc tích hợp trí tuệ nhân tạo và mô hình hệ thống động trong đánh giá tác động của quy hoạch nhà cao tầng đến giao thông nội đô; đồng thời minh họa khung phương pháp bằng một mô hình bốn phân hệ kho - dòng áp dụng cho vùng TOD bán kính 1 km quanh nút giao Ngã tư Thủ Đức. Tổng quan cho thấy nghiên cứu SD quốc tế mạnh về cấu trúc nhân - quả nhưng thiếu ràng buộc dữ liệu địa phương và ít nhắm trực tiếp vào biến FSI. Nghiên cứu AI/ML thực tế mạnh về dự báo ngắn hạn nhưng thiếu khung nhân - quả dài hạn trong khi nghiên cứu trong nước về SD, TOD và kiểm soát cao tầng còn ở mức định hướng chính sách.

Kết quả mô phỏng cho thấy áp lực dân số từ phát triển cao tầng có thể đẩy V/C vượt ngưỡng cảnh báo 0,85 nếu FSI mục tiêu được đẩy đến trần quy định TOD (1,5 lần) mà không đi kèm mở rộng hạ tầng: V/C tăng từ khoảng 0,64 (2025) lên khoảng 1,05 (2035) ở kịch bản trần với năng lực thông hành hiện trạng 10 làn, vượt ngưỡng vào khoảng năm 2031. Khi kết hợp với dự án mở rộng Xa lộ Hà Nội lên 16 làn (dự kiến hoàn thành năm 2027), V/C ở cùng kịch bản FSI chỉ còn khoảng 0,66 vào năm 2035. Như vậy, dư địa tăng FSI theo quy định TOD chỉ khả thi về giao thông nếu đồng bộ với tiến độ mở rộng hạ tầng; nếu tốc độ lấp đầy dân cư vượt trước, khu vực nút giao có nguy cơ quá tải trước năm 2035.

Hạn chế chính của nghiên cứu là một số tham số về hành vi đi lại, lưu lượng quá cảnh, hệ số hàm BPR và sàn ở cao tầng ban đầu vẫn chưa được hiệu chuẩn/đối chiếu bằng số liệu thực địa. Giai đoạn tiếp theo sẽ ưu tiên đếm xe và đo trễ tại nút giao, khảo sát hộ gia đình trong bán kính TOD, đối chiếu diện tích sàn chung cư với hồ sơ cấp phép của Sở Xây dựng, huấn luyện và hiệu chuẩn thành phần AI/học máy để xác định ngưỡng FSI phù hợp.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ dự án mã số SV2026-344, với sự tài trợ của Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP Hồ Chí Minh

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H. Arksey and L. O'Malley. Scoping studies: towards a methodological framework. International Journal of Social Research Methodology, vol. 8, no. 1, pp. 19-32, 2005, doi: 10.1080/1364557032000119616.

[2] A. C. Tricco et al. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. Annals of Internal Medicine, vol. 169, no. 7, pp. 467-473, 2018, doi: 10.7326/M18-0850.

[3] G. Fabolude, C. Knoble, A. Vu, and D. Yu. Smart cities, smart systems: A comprehensive review of system dynamics model applications in urban studies in the big data era. Geography and Sustainability, vol. 6, no. 1, p. 100246, 2025, doi: 10.1016/j.geosus.2024.10.002.

[4] X. Li, G. Wang, Y. Zhu and W. Liu. A System Dynamics-Based Simulation Study on Urban Traffic Congestion Mitigation and Emission Reduction Policies. Sustainability, vol. 17, no. 20, p. 9296, 2025, doi: 10.3390/su17209296.

[5] S. Jia, X. Zhang and K. Li. System dynamics modeling for improving the policy effect of traffic energy consumption and CO_2 emissions. Sustainable Cities and Society, vol. 90, p. 104398, 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104398.

[6] G. Chen and J. Zhang. Intelligent transportation systems: Machine learning approaches for urban mobility in smart cities. Sustainable Cities and Society, vol. 107, p. 105369, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105369.

[7] H. Zhao, Dong, C., Cao, J., & Chen, Q. A survey on deep reinforcement learning approaches for traffic signal control. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 133, no. Part A, p. 108100, 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2024.108100.

[8] P. P. Reddy and C. V. Rao. Assessing the Impact of Floor Space Index (FSI) Regulations on Urban Density and Infrastructure Development in Hyderabad. Kokoh, vol. 23, no. 2, pp. 11-22, 2025. Internet: https://ejournal.upi.edu/index.php/kokoh/article/view/82204 (accessed: 9/2026).

[9] R. D. Tirumala and P. Tiwari. Beyond Rules: Market Logic, Institutional Lag, and the Limits of Floor Space Index Deregulation in Hyderabad. Land, vol. 14, no. 12, p. 2382, 2025, doi: 10.3390/land14122382.

[10] T. Nguyen, S. Cook and V. Ireland, Application of System Dynamics to Evaluate the Social and Economic Benefits of Infrastructure Projects, Systems, vol. 5, no. 2, p. 29, 2017, doi: 10.3390/systems5020029.

[11] Huỳnh Thị Yến Thảo, Trần Quang Phú. Nghiên cứu mô hình hệ thống động trong quản lý rủi ro các siêu dự án giao thông tại Việt Nam. Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải, số 27-28, tr. 209-213, 2018. Internet: https://vjol.info.vn/index.php/ut/article/view/45626 (truy cập: tháng 9/2026).

[12] Hoàng Văn Dương, Lương Đức Long. Xây dựng mô hình hỗ trợ System Dynamics và quản lý rủi ro trong giai đoạn chuẩn bị thực hiện dự án nhà cao tầng của chủ đầu tư tại TP.HCM. Tạp chí Xây dựng, số 7, tr. 90-96, 2021. Internet: https://vjol.info.vn/index.php/tcxd/article/view/59083 (truy cập: tháng 9/2026).

[13] Nguyễn Thị Mai Chi, Nguyễn Thị Thanh Mai, Lại Thị Ngọc Diệp, Nguyễn Ngọc Hùng, Nguyễn Xuân Nghĩa. Chuyển đổi mô hình giao thông thích ứng với sự phục vụ của phương tiện công cộng sức chở lớn, tốc độ cao (UMRT) tại khu vực nội đô TP Hà Nội. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng, số 4V, tr. 236-250, 2022.

[14] TS.KTS Nguyễn Hoàng Minh. Kiểm soát phát triển công trình cao tầng - Kinh nghiệm quốc tế, ngày 05/10/2017. Internet: https://qhkt.hochiminhcity.gov.vn/goc-nhin/kiem-soat-phat-trien-cong-trinh-cao-tang-kinh-nghiem-quoc-te-113.html (truy cập: tháng 6/2026).

[15] Sở Quy hoạch - Kiến trúc TP.HCM. Đánh giá công tác quy hoạch TP.HCM và định hướng quy hoạch hướng đến Thành phố toàn cầu. Tạp chí Xây dựng, 20/11/2022. Intermet: https://tapchixaydung.vn/danh-gia-cong-tac-quy-hoach-tphcm-va-dinh-huong-quy-hoach-huong-den-thanh-pho-toan-cau-20201224000014432.html (truy cập: tháng 6/2026).

[16] Nguyễn Thành Hưng. Thiệt hại hàng tỉ USD vì hạ tầng quá tải, những giải pháp TP.HCM cần làm ngay. Báo Tuổi Trẻ. Internet: https://tuoitre.vn/thiet-hai-hang-ti-usd-vi-ha-tang-qua-tai-nhung-giai-phap-tp-hcm-can-lam-ngay-20250807095909853.htm (truy cập: tháng 9/2026).

[17] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 4054:2005 - Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế, 2005.

[18] Hội đồng nhân dân TP.HCM. Nghị quyết 38/2025/NQ-HĐND quy định chỉ tiêu sử dụng đất quy hoạch trong khu vực TOD dọc tuyến Metro số 1, Metro số 2 và Vành đai 3 theo Nghị quyết 98/2023/QH15. Internet: https://thuviennhadat.vn/phap-luat/chi-tieu-su-dung-dat-quy-hoach-trong-quy-hoach-khu-vuc-tod-tai-tphcm-theo-nghi-quyet-38-2025-nq-hdnd-705403.html (truy cập: tháng 6/2026).

[19] Phường Thủ Đức - Bản đồ và thông tin sáp nhập 2025. Tinhthanhvn.com. Internet: https://tinhthanhvn.com/province/ho-chi-minh/phuong-thu-duc (truy cập: tháng 6/2026).

[20] Hà Linh. Toàn Cảnh Ga Metro Ngã tư Thủ Đức: Vị trí, kết nối và tiềm năng Bất động sản. Wiki Batdongsan.com.vn. Internet: https://wiki.batdongsan.com.vn/wiki/ga-metro-nga-tu-thu-duc-849119 (truy cập: tháng 6/2026).

[21] Như Ngọc. TP.HCM có hơn 7,6 triệu xe máy, tạo ra áp lực giao thông thế nào? Báo Pháp Luật TP.HCM, ngày 22/8/2024. Internet: https://plo.vn/tphcm-co-hon-76-trieu-xe-may-tao-ra-ap-luc-giao-thong-the-nao-post806429.html (truy cập: tháng 6/2026).

[22] Thông tin dịch vụ. Xa lộ Hà Nội mở rộng lên 16 làn xe, khu Đông vào giai đoạn tăng tốc. Báo Thanh Niên, ngày 21/10/2025. Internet: https://thanhnien.vn/xa-lo-ha-noi-mo-rong-len-16-lan-xe-khu-dong-vao-giai-doan-tang-toc-18525102108163846.htm (truy cập: tháng 6/2026).

■Ngày nhận bài: 18/9/2026 ■Ngày sửa bài: 29/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 10/10/2026

Mối liên hệ giữa nhận thức rủi ro và hành vi vi phạm giao thông khi đi xe máy của sinh viên: Nghiên cứu trường hợp ở Trường Đại học Giao thông vận tải

Relationship between risk perception and traffic violation behaviors among students riding motorcycles: A case study at the University of Transport and Communications

> THS CÙ THỊ THỤC ANH, TS VƯƠNG XUÂN CẦN*, THS CAO QUANG KHẢI
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: vuongcan@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Tai nạn xe máy liên quan đến nhóm người trẻ tuổi, trong đó có sinh viên, vẫn là một vấn đề đáng quan tâm về an toàn giao thông ở nhiều quốc gia, bao gồm Việt Nam, do nhóm đối tượng này có những hành vi điều khiển xe tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn. Nhận thức rủi ro được xem là một yếu tố quan trọng có liên quan đến các hành vi này, tuy nhiên, mối liên hệ giữa chúng vẫn chưa được làm rõ. Nghiên cứu này nhằm khảo sát mối liên hệ giữa nhận thức rủi ro và hành vi vi phạm giao thông của sinh viên đại học. Nhận thức rủi ro được xem xét trên ba khía cạnh, bao gồm nhận thức về mức độ nguy hiểm, nhận thức về khả năng xảy ra tai nạn và sự lo lắng về tai nạn. Dữ liệu khảo sát được thu thập thông qua bảng hỏi từ 239 sinh viên Trường Đại học Giao thông vận tải và được phân tích bằng mô hình cấu trúc tuyến tính bình phương tối thiểu từng phần (PLS-SEM). Kết quả cho thấy nhận thức về mức độ nguy hiểm và sự lo lắng về tai nạn có mối liên hệ với hành vi vi phạm giao thông. Trong khi đó, nhận thức về khả năng xảy ra tai nạn không có mối liên hệ với hành vi này. Những phát hiện của nghiên cứu góp phần giúp các nhà quản lý an toàn giao thông hiểu rõ hơn vai trò của nhận thức rủi ro, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp nhằm giảm thiểu hành vi vi phạm giao thông của sinh viên.

Từ khóa: Nhận thức rủi ro; hành vi vi phạm giao thông; sinh viên.

ABSTRACT

Motorcycle accidents involving young people, such as university students, remain a pressing traffic safety issue in many countries, including Vietnam, due to their engagement in risky riding behaviors. Risk perception is considered a crucial factor associated with these behaviors, yet it is not fully understood. This study aims to examine the relationship between risk perception and traffic violation behaviors among university students. Risk perception is analyzed across three factors, including perception of hazard criticality, probability assessment of accidents, and worry regarding accidents. Survey data were collected from 239 students at the University of Transport and Communications and analyzed using the Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) approach. The results indicate that the perception of hazard criticality and worry regarding accidents have a significant relationship with traffic violation behaviors. In contrast, probability assessment of accidents has no connection with these behaviors. These findings provide traffic safety authorities with a better understanding of the role of risk perception and serve as a basis for proposing solutions to reduce traffic violation behavior among students.

Keywords: Risk perception; traffic violation behaviors; students.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo báo cáo năm 2023 của Tổ chức Y tế Thế giới (WHO), có hơn 1,19 triệu người chết và khoảng 50 triệu người bị thương do tai nạn giao thông (TNGT) đường bộ trên thế giới ở năm 2021 [1]. Đây là nguyên nhân hàng đầu dẫn đến tử vong ở trẻ em và thanh thiếu niên trong độ tuổi 5 - 29. Một số nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, người trẻ tuổi đi xe máy chịu ảnh hưởng nặng nề và không cân xứng bởi các vụ TNGT, nhất là trong độ tuổi 18 - 24 [2]. Ở Việt Nam, TNGT cũng là một trong những nguyên nhân hàng đầu gây tử vong ở nhóm người trẻ tuổi và số ca tử vong do TNGT tăng mạnh ở nhóm 15 - 24 tuổi [3]. Xe máy vẫn là phương tiện chủ yếu của người dân Việt Nam, nên đây cũng là loại phương tiện chủ yếu của người trẻ tuổi, trong đó có sinh viên. Các nguyên nhân chính dẫn đến tai nạn vẫn chủ yếu là do yếu tố con người với các hành vi vi phạm giao thông như chạy vượt tốc độ quy định, đi sai phần đường, làn đường, vượt đèn đỏ, v.v.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng nhận thức rủi ro có mối liên hệ nhất định với các hành vi vi phạm giao thông. Ở đây, nhận thức rủi ro thể hiện cảm nhận chủ quan về mối nguy hiểm tiềm tàng nằm trong các hành vi lái xe không an toàn [4], và có mối tương quan với TNGT [5]. Nó có thể được đo lường thông qua bảng câu hỏi, thí nghiệm mô phỏng và quan sát thực tế…[6]. Liên quan đến phương pháp bảng hỏi để khảo sát nhận thức rủi ro của người lái xe, hiện nay chưa có một bảng hỏi thống nhất. Thông thường, sử dụng bảng hỏi với 2-3 khía cạnh khác nhau. Ví dụ, Ulleberg và Rundmo đã sử dụng đánh giá khả năng TNGT và mức độ lo âu để phản ánh nhận thức về rủi ro [7]. Rundmo và Iversen phân tích nhận thức rủi ro, đánh giá năng lực lái xe và sự lo âu [4]. Wang và cộng sự đã xem xét ba yếu tố, bao gồm mức độ nguy hiểm, mức độ lo âu, và đánh giá ngẫu nhiên (stochastic evaluation) để phân tích nhận thức rủi ro của người điều khiển xe điện hai bánh [8]. Machin và Sankey khảo sát các khía cạnh về sự lo âu, khả năng xảy ra tai nạn, nhận thức về sự tự tin, và ác cảm với hành vi nguy hiểm để phản ánh nhận thức rủi ro [9]. Santosa và cộng sự cho thấy rằng, nhận thức rủi ro có mối liên hệ với các hành vi vi phạm giao thông ở người trẻ tuổi đi xe máy ở Indonesia [10].

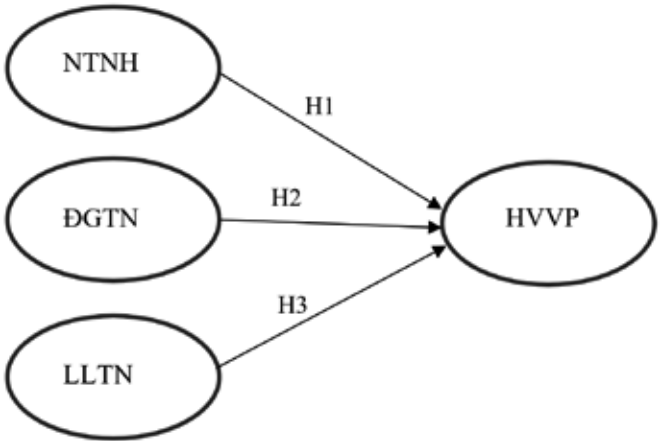
Ở Việt Nam, một số học giả cũng cố gắng khảo sát nhận thức rủi ro của các đối tượng khác nhau dựa trên việc điều chỉnh các nghiên cứu ở nước ngoài. Điển hình, các tác giả trong nghiên cứu [11] đã khảo sát nhận thức rủi ro của người đi xe đạp thông qua nhận thức về mức độ nguy hiểm, đánh giá khả năng và sự lo âu. Độ tin cậy của bảng hỏi nhận thức rủi ro của người điều khiển xe máy nói chung dựa vào sự lo âu, đánh giá khả năng và nhận thức mức độ nguy hiểm đã được phân tích trong nghiên cứu [12 - 13]. Trong nghiên cứu [14], các tác giả đã tập trung vào khảo sát các yếu tố quyết định thái độ đối với ATGT và hành vi nguy hiểm của học sinh trung học phổ thông sử dụng xe đạp điện. Trong mô hình của họ, nhận thức rủi ro ảnh hưởng đến cả thái độ đối với ATGT và hành vi nguy hiểm. Tuy nhiên, việc áp dụng mô hình PLS-SEM (Partial Least Squares Structural Equation Modeling) để xem xét mối liên hệ giữa nhận thức rủi ro và hành vi vi phạm giao thông của sinh viên đại học khi đi xe máy ở nước ta còn khá hạn chế. Xuất phát từ đó, nghiên cứu này tập trung vào việc áp dụng PLS-SEM để xem xét mối liên hệ giữa nhận thức rủi ro và một số hành vi nguy hiểm của sinh viên Trường Đại học Giao thông Vận tải khi đi xe máy trong điều kiện giao thông ở Hà Nội.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình nghiên cứu

Trên cơ sở tổng quan tài liệu trong và ngoài nước, mô hình nghiên cứu được thể hiện trên Hình 1. Mô hình bao gồm 4 biến nghiên cứu: nhận thức về mức độ nguy hiểm (NTNH), đánh giá khả năng tai nạn (ĐGTN), sự lo lắng về tai nạn (LLTN), và hành vi vi phạm giao thông (HVVP). Trong mô hình này, hành vi vi phạm giao thông của sinh viên khi đi xe máy có mối liên hệ với các yếu tố còn lại. Từ đó, các giả thuyết nghiên cứu như sau:

- H1: NTNH có mối liên hệ với HVVP.
- H2: ĐGTN có mối liên hệ với HVVP.
- H3: LLTN có mối liên hệ với HVVP.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này sử dụng các thang đo đã được phát triển từ các nghiên cứu trước để đo lường các biến trong mô hình nghiên cứu [12 - 13]. Các biến quan sát của các yếu tố trong mô hình nghiên cứu như sau: Nhận thức về mức độ nguy hiểm (NTNH) bao gồm 7 biến quan sát (NTNH1-NTNH7); đánh giá khả năng tai nạn (ĐGTN) có 4 biến quan sát (ĐGTN1-ĐGTN4); sự lo lắng về tai nạn (LLTN) bao gồm 4 biến quan sát (LLTN1-LLTN4); hành vi vi phạm giao thông (HVVP) bao gồm 10 biến quan sát (HVVP1-HVVP10).

Một bảng hỏi được thiết kế để đo lường các biến quan sát ở trên đối với sinh viên Trường Đại học Giao thông Vận tải khi điều khiển xe máy ở Hà Nội. Bảng hỏi này bao gồm lời chào và giới thiệu về mục đích nghiên cứu, thông tin cá nhân và nội dung câu hỏi chính về các yếu tố ở trên. Câu hỏi được thiết kế theo thang đo Likert 5 điểm (1 - rất không đồng ý à 5 - rất đồng ý). Bảng hỏi được thực hiện khảo sát theo hình thức trực tiếp bởi người khảo sát. Sinh viên được người khảo sát tiếp cận, được trao đổi về mục đích của nghiên cứu và được mời tham gia khảo sát. Sau khi sinh viên đồng ý, họ được phát bảng hỏi để tự phản hồi ý kiến của mình về những phát biểu trong bảng hỏi. Chi tiết các câu hỏi được trình bày trong Bảng 1 dưới đây.

Về phương pháp và công cụ phân tích, để khám phá mối quan hệ giữa nhận thức rủi ro và hành vi vi phạm giao thông, nghiên cứu này sử dụng mô hình phương trình cấu trúc tuyến tính (Structural Equation Modeling, SEM) dựa trên bình phương tối thiểu từng phần (Partial Least Squares, PLS), còn được gọi là mô hình PLS-SEM. Nó có khả năng phân tích các mô hình phức tạp với kích thước mẫu nhỏ mà không yêu cầu phân phối chuẩn. Đồng thời, nó cũng có thế mạnh trong phân tích khám phá và dự báo [15 - 16]. Việc đánh giá hai mô hình chính của PLS-SEM, bao gồm mô hình đo lường và mô hình cấu trúc ở đây được thực hiện qua phần mềm SmartPLS 4.1.1.6 [17].

2.3. Kết quả nghiên cứu

2.3.1. Đặc trưng mẫu

Mẫu quan sát gồm 239 bảng hỏi được thu thập trong khoảng thời gian từ 10/08 đến 10/09/2026 bằng phương pháp lấy mẫu thuận tiện. Bảng khảo sát được mã hóa và nhập vào phần mềm SPSS và PLS-SEM. Kết quả phân tích cho thấy, mẫu thu thập có tỷ lệ giới tính nam là 71.5% và còn lại 28.5% là nữ. Về ngành học, kinh tế chiếm 18.4%, kỹ thuật chiếm 51.0%, công nghệ chiếm 14.6%, quản lý chiếm 12.1% và còn lại là các lĩnh vực khác. Về năm học của sinh

viên, năm thứ 1 chiếm 2.1%, năm thứ 2 chiếm 20.1%, năm thứ 3 chiếm 36.0%, năm thứ 4 chiếm 27.6% và còn lại là năm thứ 5.

2.3.2. Đánh giá mô hình đo lường

Sau khi phân tích, tất cả các hệ số tải ngoài (outer loadings) của các biến quan sát đều vượt quá 0.7 [15]. Nó thể hiện khả năng giải thích tốt cho các biến quan sát trong mô hình nghiên cứu. Giá trị độ tin cậy tổng hợp (Composite Reliability, CR) và hệ số Cronbach's alpha (CA) của mỗi biến nghiên cứu đều vượt quá giá trị ngưỡng 0.7 [15]. Điều này cho thấy các biến đều đáng tin cậy. Về tính hội tụ, giá trị AVE (Average Variance Extracted) của mỗi biến nghiên cứu vượt ngưỡng 0.5 nên sự hội tụ được đảm bảo (Bảng 1).

Bảng 1. Kết quả của đánh giá mô hình đo lường

Biến nghiên cứu	Biến quan sát	Ký hiệu	Hệ số tải ngoài	CA	CR	AVE
Nhận thức về mức độ nguy hiểm (NTNH)	TNGT liên quan đến xe máy có thể gây hậu quả nghiêm trọng.	NTNH1	0.792	0.913	0.931	0.659
	Tai nạn xe máy có thể gây thương tích nghiêm trọng hoặc lâu dài.	NTNH2	0.812			
	Vi phạm đèn đỏ có thể dẫn đến TNGT nghiêm trọng.	NTNH3	0.841			
	Đi ngược chiều có thể dẫn đến hậu quả nghiêm trọng.	NTNH4	0.874			
	Sử dụng điện thoại khi lái xe có thể dẫn đến TNGT nghiêm trọng.	NTNH5	0.884			
	Chạy nhanh hơn các xe xung quanh làm tăng mức độ nguy hiểm.	NTNH6	0.761			
	Lái xe sau khi đã uống rượu có thể dẫn đến TNGT nghiêm trọng.	NTNH7	0.703			
Đánh giá khả năng tai nạn (ĐGTN)	Khả năng bản thân gặp TNGT khi đi xe máy là đáng kể.	ĐGTN1	0.893	0.885	0.919	0.741
	Có khả năng bị thương nếu xảy ra TNGT khi đi xe máy.	ĐGTN2	0.777			
	Nguy cơ gặp TNGT của tôi khi đi xe máy cao hơn một số người khác.	ĐGTN3	0.9			
	Đi xe máy có nguy cơ gặp TNGT cao hơn một số loại xe khác.	ĐGTN4	0.867			
Sự lo lắng về tai nạn (LLTN)	Cảm thấy không an toàn khi nghĩ đến khả năng bị thương trong TNGT khi đi xe máy.	LLTN1	0.838	0.909	0.935	0.784
	Lo lắng rằng mình có thể bị thương trong một vụ TNGT khi đi xe máy.	LLTN2	0.916			
	Lo ngại khi nghĩ rằng người khác có thể bị thương do TNGT	LLTN3	0.908			
	Khi đi xe, nghĩ về TNGT và cho rằng bản thân có thể là nạn nhân.	LLTN4	0.878			
Hành vi vi phạm giao thông (HVVP)	Vượt đèn đỏ hoặc không chấp hành tín hiệu giao thông.	HVVP1	0.845	0.957	0.963	0.721
	Đi ngược chiều hoặc đi vào đường cấm.	HVVP2	0.88			
	Cố ý chạy vượt quá tốc độ quy định.	HVVP3	0.827			
	Đi xe trên vỉa hè dành cho người đi bộ khi không được phép.	HVVP4	0.868			
	Vượt phương tiện khác trong điều kiện không an toàn	HVVP5	0.858			
	Sử dụng điện thoại khi đang điều khiển xe máy	HVVP6	0.817			
	Điều khiển xe sau khi đã uống rượu, bia.	HVVP7	0.851			
	Không đội mũ bảo hiểm khi đi xe máy.	HVVP8	0.884			
	Chở số người vượt quá quy định.	HVVP9	0.877			
	Rẽ mà không bật đèn xi-nhan	HVVP10	0.783			

Giá trị phân biệt có thể được thực hiện thông qua tiêu chuẩn Fornell-Larcker với căn bậc hai của AVE cho mỗi biến nghiên cứu trong mô hình cao hơn các giá trị tương quan tương ứng với các biến khác [18]. Kết quả về giá trị phân biệt trên Bảng 2 cho thấy, tiêu chuẩn Fornell-Larcker được đảm bảo.

Bảng 2. Tiêu chuẩn Fornell-Larcker

	ĐGTN	LLTN	NTNH	HVVP
ĐGTN	**0.861**			
LLTN	0.554	**0.885**		
NTNH	0.016	0.276	**0.812**	
HVVP	0.166	0.105	-0.262	**0.849**

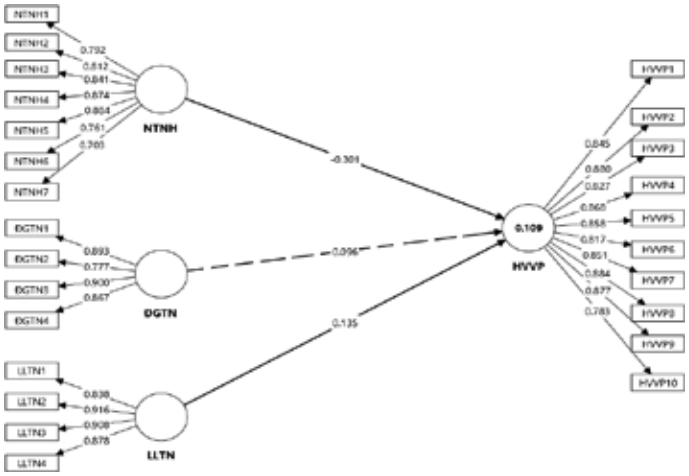
2.3.3. Đánh giá mô hình cấu trúc

Trước khi đánh giá mô hình cấu trúc, vấn đề đa cộng tuyến được kiểm tra bằng hệ số phóng đại phương sai (Variance Inflation Factor, VIF). Kết quả cho thấy, tất cả các giá trị VIF đều nhỏ hơn ngưỡng khuyến nghị là 5 (Bảng 3), cho nên, hiện tượng đa cộng tuyến không phải là vấn đề đáng lo ngại đối với mô hình nghiên cứu. Tiếp theo, kỹ thuật Bootstrapping với 5000 mẫu đã được thực hiện để xác định các hệ số đường dẫn (β). Hệ số này có ý nghĩa khi giá trị T-value trong kiểm định hai phía lớn hơn các giá trị ngưỡng là 1.65, 1.96 và 2.57 tương ứng với mức ý nghĩa lần lượt là 10% (P-value = 0.1), 5% (P-value = 0.05) và 1% (P-value = 0.01) [19]. Kết quả phân tích cho thấy, giả thuyết H1 được hỗ trợ ở mức ý nghĩa ít nhất là 1%; giả thuyết H3 được hỗ trợ ở mức ý nghĩa ít nhất là 10%; giả thuyết H2 không được hỗ trợ trong nghiên cứu này (Bảng 3 và Hình 2).

Bảng 3. Kết quả của đánh giá mô hình cấu trúc

Đường dẫn	Hệ số β	T values	VIF	P values	Giả thuyết
NTNH à HVVP	-0,301	4,565	1,116	0,000	H1 được hỗ trợ
ĐGTNà HVVP	0,096	1,459	1,487	0,145	H2 không được hỗ trợ
LLTN à HVVP	0,135	1,753	1,609	0,080	H3 được hỗ trợ

Kết quả cũng cho thấy, hệ số xác định (R^2) là 0.109, vượt ngưỡng chấp nhận tối thiểu 0.1 như được đề cập trong nghiên cứu [20]. Với giá trị này, nó thể hiện rằng khoảng 10.9% phương sai trong biến "HVVP" được giải thích bởi các biến độc lập trong mô hình nghiên cứu. Kết quả cho thấy, khả năng giải thích của mô hình đối với biến nội sinh còn hạn chế. Tuy nhiên, nhận thức rủi ro vẫn có mối liên hệ với hành vi vi phạm giao thông của sinh viên. Điều này cho thấy các yếu tố nhận thức rủi ro trong nghiên cứu có vai trò nhất định, nhưng chưa đủ mạnh để giải thích đầy đủ sự khác biệt về hành vi giữa các cá nhân. Đồng thời, hành vi vi phạm giao thông của sinh viên còn có mối liên hệ với các yếu tố khác ngoài nhận thức rủi ro mà chúng chưa được xem xét trong nghiên cứu này.



Hình 2. Kết quả của mô hình nghiên cứu (đường nét đứt biểu thị giả thuyết không được hỗ trợ)

Trong các yếu tố của nhận thức rủi ro được phân tích, nhận thức về mức độ nguy hiểm (NTNH) và sự lo lắng về tai nạn (LLTN) có mối liên hệ đáng kể với các hành vi vi phạm giao thông (HVVP), còn đánh giá khả năng tai nạn (ĐGTN) không có mối liên hệ với các hành vi vi phạm giao thông. Trong đó, NTNH có ảnh hưởng âm có ý nghĩa đến HVVP, còn LLTN có ảnh hưởng dương có ý nghĩa đến HVVP. Phản ánh rằng, nhận thức về mức độ nguy hiểm càng cao thì sẽ làm giảm hành vi vi phạm giao thông. Do đó, cần các giải pháp nâng cao nhận thức về mức độ nguy hiểm của các hành vi vi phạm giao thông cho sinh viên để từ đó có thể giảm thiểu các hành vi vi phạm này. Sự lo lắng về tai nạn có thể thúc đẩy sự thận trọng hơn khi tham gia giao thông, nhưng trong điều kiện giao thông hỗn hợp phức tạp phụ thuộc vào xe máy như ở Hà Nội lại tạo ra ảnh hưởng ngược. Khi sự lo lắng tăng lên cao, có thể dẫn đến gia tăng sự căng thẳng tâm lý, làm giảm sự tập trung, giảm năng lực xử lý tình huống và kiểm soát hành vi của người lái xe. Trong quá trình tham gia giao thông, sinh viên gặp phải các tình huống bất ngờ, cùng với trạng thái tâm lý căng thẳng, có thể khiến họ đưa ra các quyết định xử lý sai sót, thậm chí vi phạm giao thông. Do đó, cần thiết gia tăng kiến thức và kỹ năng xử lý các tình huống giao thông để gia tăng mức độ tự tin cho sinh viên khi tham gia giao thông trong điều kiện giao thông hỗn hợp phụ thuộc vào xe máy như Hà Nội. Nghiên cứu này không thấy mối liên hệ có ý nghĩa giữa ĐGTN và HVVP. Điều này phần nào phản ánh rằng sinh viên, mặc dù đánh giá chung rằng việc đi xe máy có nguy cơ gặp tai nạn cao, nhưng họ có thiên kiến chủ quan về năng lực lái xe của mình. Vì vậy, họ nhận thức được khả năng xảy ra tai nạn nhưng chưa tạo ra động lực để thay đổi hành vi vi phạm.

3. KẾT LUẬN

Nhận thức rủi ro của sinh viên khi đi xe máy là một trong những khía cạnh rất được quan tâm khi nghiên cứu về các hành vi giao thông nguy hiểm nhằm tìm kiếm các giải pháp phù hợp để giảm nguy cơ TNGT cho nhóm đối tượng này. Với 239 mẫu quan sát từ các sinh viên của Trường Đại học Giao thông vận tải, kết quả mô hình PLS-SEM cho thấy rằng nhận thức về mức độ nguy hiểm và sự lo lắng về tai nạn có mối liên hệ đáng kể với các hành vi vi phạm giao thông của sinh viên. Đây là cơ sở để nhà quản lý, nhà giáo dục và người làm công tác quản lý ATGT có những biện pháp phù hợp về tuyên truyền và giáo dục cho sinh viên nhằm hướng đến giảm thiểu các hành vi vi phạm giao thông. Bên cạnh đó, cần thiết phải tăng cường đào tạo kỹ năng xử lý tình huống cho sinh viên.

Ngoài các kết quả đạt được, nghiên cứu này còn một số hạn chế cần được thừa nhận để tiếp tục hoàn thiện trong tương lai như sau: (1) Số mẫu quan sát còn hạn chế ở trong một trường đại học nên khả năng khái quát hóa chưa cao, cần mở rộng ra nhiều trường đại học; (2) phương pháp lấy mẫu thuận lợi, nên trong tương lai cần có các phương pháp lấy mẫu hiệu quả hơn; (3) nghiên cứu là nghiên cứu cắt ngang, trong tương lai cũng cần triển khai nghiên cứu theo chiều dọc; (4) khả năng giải thích của mô hình còn hạn chế, nên cần thiết mở rộng thêm các yếu tố khác (ví dụ như áp lực từ xã hội, thói quen lái xe, kinh nghiệm lái xe, v.v.) để gia tăng năng lực của mô hình.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện với sự tài trợ của Trường Đại học Giao thông vận tải thông qua đề tài mã số T2026-MT-002. Tác giả xin trân trọng cảm ơn các sinh viên đã dành thời gian tham gia khảo sát và cung cấp thông tin phục vụ nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] WHO. Global status report on road safety 2023.

[2] H. Hoang, H. T. Bui, and M. Cools. Assessing the impact of traffic climate and risk-taking attitude on the risky riding behaviour of young motorcyclists in Vietnam. Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav., vol. 109, pp. 336-353, 2025.

[3] Cục Thống kê. Báo cáo quốc gia về đăng ký và thống kê hộ tịch giai đoạn 2021-2024. NXB. Thống kê, 2025.

[4] T. Rundmo and H. Iversen. Risk perception and driving behaviour among adolescents in two Norwegian counties before and after a traffic safety campaign. Saf. Sci., vol. 42, no. 1, pp. 1-21, 2004.

[5] M. S. Horswill, A. E. Waylen, and M. I. Tofield. Drivers' Ratings of Different Components of Their Own Driving Skill: A Greater Illusion of Superiority for Skills That Relate to Accident Involvement 1. J. Appl. Soc. Psychol., vol. 34, no. 1, pp. 177-195, 2004.

[6] C. Vlek and P.-J. Stallen. Rational and personal aspects of risk. Acta Psychol. (Amst.), vol. 45, no. 1-3, pp. 273-300, 1980.

[7] P. Ulleberg and T. Rundmo. Personality, attitudes and risk perception as predictors of risky driving behaviour among young drivers. Saf. Sci., vol. 41, no. 5, pp. 427-443, 2003.

[8] T. Wang, S. Xie, X. Ye, X. Yan, J. Chen, and W. Li. Analyzing e-bikers' risky riding behaviors, safety attitudes, risk perception, and riding confidence with the structural equation model. Int. J. Environ. Res. Public. Health, vol. 17, no. 13, p. 4763, 2020.

[9] M. A. Machin and K. S. Sankey. Relationships between young drivers' personality characteristics, risk perceptions, and driving behaviour. Accid. Anal. Prev., vol. 40, no. 2, pp. 541-547, 2008.

[10] D. P. Santosa, S. Mayuni, H. H. Sugasta, F. Adibah and D. C. Saputra. The Influence of Risk Perception and Risky Riding Behavior on Motorcycle Accident Involvement among Young Riders in Surabaya. J. Tek. Sipil, vol. 26, no. 1, pp. 2732-2742, 2026.

[11] X. C. Vương, H. T. Đỗ, T. H. Nguyễn. Nhận thức rủi ro của thanh thiếu niên đi xe đạp tại Hà Nội. Tạp chí GTVT, số. 11, tr. 99-102, 2019.

[12] V. X. Can, M. Rui-Fang, V. T. Thuat, N. T. An. Reliability and validity of scale measuring motorcyclists' risk perception: the case study of Hanoi, Vietnam. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, pp. 29-33, 2023.

[13] X. C. Vuong, R.-F. Mou, T. T. Vu, T. A. Nguyen, T. T. A. Cu, and C. T. Nguyen. Assessing significant factors affecting risky riding behaviors of Vietnamese motorcyclists using a contextual mediated model. J. Adv. Transp., vol. 2023, no. 1, p. 2179828, 2023.

[14] V. H. Nam. Examining the determinants of electric bike riders' attitudes towards traffic safety and risky driving behaviours amongst high-school students in Vietnam. Transp. Res. Interdiscip. Perspect., vol. 21, p. 100889, 2023.

[15] J. F. Hair Jr, M. Sarstedt, L. Hopkins and V. G. Kuppelwieser. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) An emerging tool in business research. Eur. Bus. Rev., vol. 26, no. 2, pp. 106-121, 2014.

[16] J. F. Hair, C. M. Ringle and M. Sarstedt. PLS-SEM: Indeed a silver bullet. J. Mark. Theory Pract., vol. 19, no. 2, pp. 139-152, 2011.

[17] SmartPLS GmbH. SmartPLS (accessed: Nov. 09, 2025). Internet: https://www.smartpls.com/.

[18] C. Fornell and D. F. Larcker. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. J. Mark. Res., vol. 18, no. 1, pp. 39-50, 1981.

[19] J. F. Hair, J. J. Risher, M. Sarstedt and C. M. Ringle. When to use and how to report the results of PLS-SEM. Eur. Bus. Rev., vol. 31, no. 1, pp. 2-24, 2019.

[20] Y. Gamil and I. Abd Rahman. Studying the relationship between causes and effects of poor communication in construction projects using PLS-SEM approach. J. Facil. Manag., vol. 21, no. 1, pp. 102-148, 2023.

■Ngày nhận bài: 10/9/2026 ■Ngày sửa bài: 21/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 29/9/2026

Đánh giá ảnh hưởng của một số tham giá chuyển hướng đến hao mòn bánh xe toa xe khách

Investigation of the effects of selected bogie parameters on passenger coach wheel wear

> TS TÀO VĂN CHIẾN
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: chientv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Để đánh giá ảnh hưởng một số tham số của toa xe đến hao mòn bánh xe, nghiên cứu này đã xây dựng mô hình đánh giá hao mòn là sự kết hợp giữa mô hình động lực học toa xe khách, mô hình tiếp xúc Hertz và mô hình hao mòn Braghin. Ứng dụng mô hình này để đánh giá ảnh hưởng của độ cứng hệ đàn hồi hộp trục và tải trọng trục đến hao mòn bánh xe toa xe khách sử dụng giá chuyển hướng lò xo không khí. Kết quả cho thấy độ cứng ngang của hệ đàn hồi hộp trục có ảnh hưởng lớn tới hao mòn; độ cứng theo phương thẳng đứng không ảnh hưởng nhiều đến hao mòn bánh xe. Bên cạnh đó, hao mòn bánh xe có xu hướng tăng khi tải trọng trục tăng.

Từ khóa: Hao mòn bánh xe; mô hình Braghin; độ cứng hệ đàn hồi; tải trọng trục; động lực học.

ABSTRACT

To evaluate the effects of several vehicle parameters on wheel wear, this study develops a wear assessment model by integrating a passenger coach dynamic model, a Hertzian wheel–rail contact model, and the Braghin wear model. The developed model is applied to investigate the effects of axlebox suspension stiffness and axle load on the wheel wear of passenger coaches equipped with air-spring bogies. The results indicate that the lateral stiffness of the axlebox suspension has a significant effect on wheel wear, whereas the vertical stiffness has a relatively limited influence. As the axle load increases, wheel wear also increases.

Keywords: Wheel wear; Braghin wear model; suspension stiffness; axle load; vehicle dynamics.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hao mòn bánh xe - ray là một hiện tượng tất yếu và từ lâu đã thu hút sự quan tâm của các chuyên gia trong và ngoài nước. Thông qua các phương pháp mô phỏng số, thử nghiệm hiện trường và nghiên cứu thực nghiệm, nhiều mô hình mô phỏng hao mòn khác nhau đã được công bố.

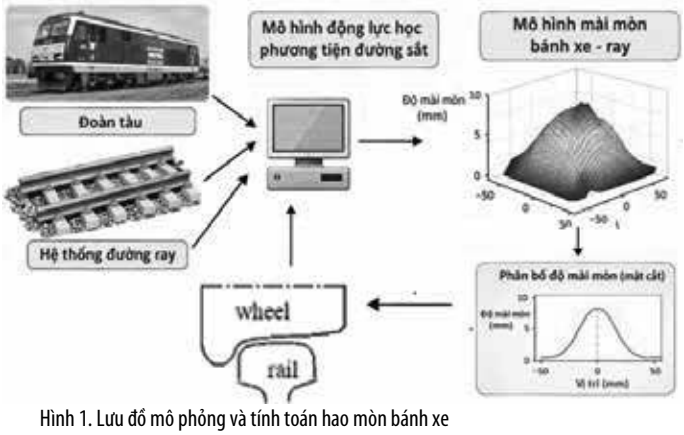
Dựa trên kết quả thực nghiệm về hao mòn bánh xe - ray, Jendel đã đề xuất mối quan hệ giữa hệ số hao mòn, ứng suất tiếp xúc và vận tốc trượt, tuy nhiên do điều kiện thực nghiệm còn hạn chế nên kết quả vẫn có những hạn chế nhất định [1]. Ward đã sử dụng các chỉ số hao mòn để dự đoán và mô phỏng quá trình hao mòn bánh xe [2]. Kevin Sawley đã nghiên cứu ảnh hưởng của hao mòn lõm đến đặc tính động lực học của phương tiện và đề xuất một biên dạng mặt lăn mới [3]. Zobory đã phát triển mô hình dự đoán hao mòn mặt lăn bánh xe dựa trên mật độ dòng năng lượng [4]. Braghin đã xây dựng một mô hình tính toán độ sâu hao mòn mặt lăn bánh xe dựa trên các kết quả thực nghiệm [5].

Hao mòn bánh xe là một quá trình rất phức tạp, chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau. Do đó, các biện pháp giảm hao mòn cần được nghiên cứu từ nhiều góc độ. Xét từ góc độ thiết kế và bảo dưỡng toa xe, có thể giảm hao mòn bánh xe khi lựa chọn hợp lý các thông số như đặc tính hệ thống treo, tải trọng trục, khoảng cách trục...

Nội dung của bài báo trình bày về đánh giá ảnh hưởng của độ cứng hệ thống đàn hồi hộp trục, tải trọng trục đến hao mòn bánh xe. Đối tượng nghiên cứu là toa xe khách sử dụng giá chuyển hướng lò xo không khí vận hành trên đường sắt Việt Nam.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

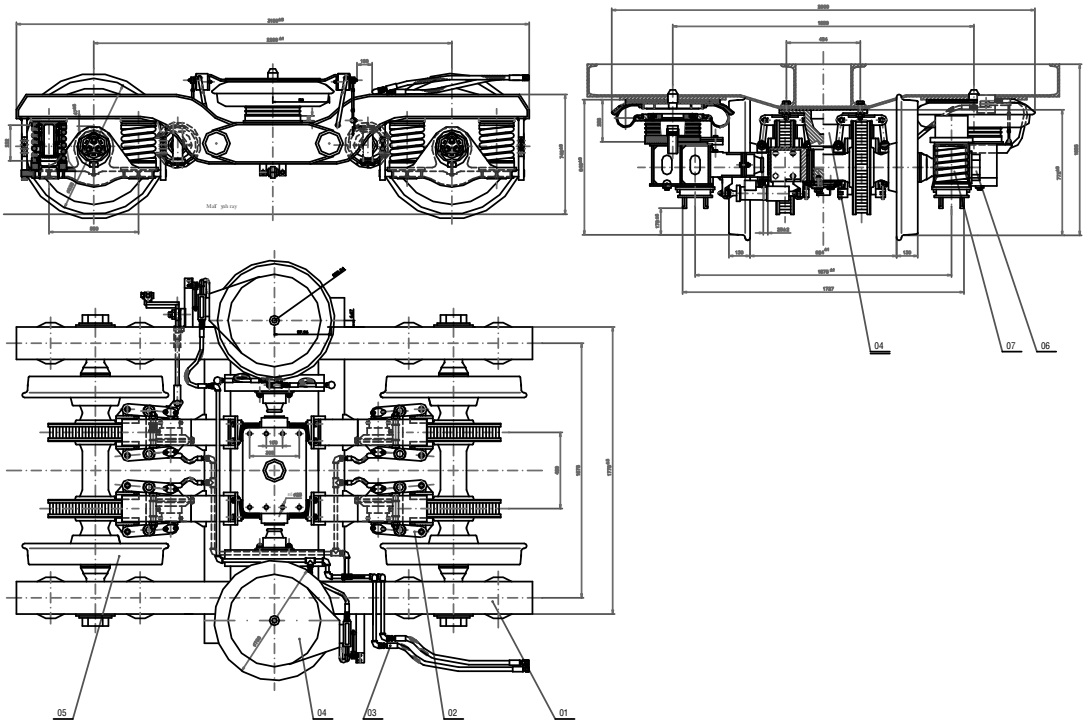
Mô hình tính toán hao mòn được thành lập dựa trên mô hình động lực học của toa xe, mô hình tiếp xúc giữa bánh xe và ray và phương pháp tính toán hao mòn của Braghin. Quá trình tính toán như Hình 1.



Hình 1. Lưu đồ mô phỏng và tính toán hao mòn bánh xe

2.1. Mô hình động lực học hệ thống toa xe - đường ray

Kết cấu giá chuyển hướng lò xo không khí như Hình 2.



1- Khung giá; 2- Giá treo cơ cấu hãm; 3- Ống gió; 4- Lò xo không khí; 5- Bộ trục bánh; 6- Hộp trục; 7- Lò xo hộp trục;

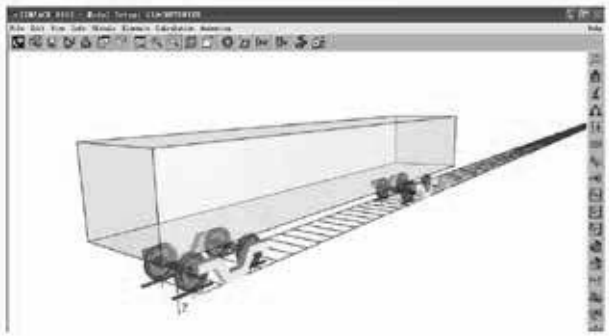
Hình 2. Kết cấu giá chuyển hướng lò xo không khí

Các thông số kết cấu và thông số kỹ thuật chi tiết của toa xe khách như trong Bảng 1

Bảng 1.Thông số kỹ thuật của giá chuyển hướng lò xo không khí [6]

TT	Thông số kỹ thuật	Trị số
1	Tốc độ cấu tạo (km/h)	100
2	Khổ đường (mm)	1000
3	Tải trọng trục (T/trục)	14
4	Cự ly trục (mm)	2200
5	Cự ly tâm cổ trục (mm)	1575
6	Đường kính bánh xe (mm)	838
7	Kiểu ổ bi ký hiệu	5″x9″
8	Khoảng cách tâm lò xo TW (mm)	1850
9	Tổng độ cứng của lò xo hộp trục theo phương thẳng đứng	3,81MN/m
10	Tổng độ cứng của lò xo hộp trục theo phương ngang	2,53MN/m
11	Hệ lò xo trung ương	Lò xo không khí
12	Hệ số giảm chấn theo phương thẳng đứng	2 x 60kN.s/m
13	Hệ số giảm chấn theo phương ngang	1 x 60kN.s/m
14	Bán kính cong thông qua cho phép nhỏ nhất (m) + Chính tuyến + Đường trong xưởng	 97 75
15	Kiểu trang trí hãm	Hãm đĩa
16	Trọng lượng một giá chuyển (kg)	5000

Trên cơ sở kết cấu và các thông số kỹ thuật chủ yếu của toa xe khách, mô hình động lực học hệ thống toa xe - đường ray được xây dựng bằng phần mềm SIMPACK [7, 8], như Hình 3. Mô hình bao gồm thân toa xe, các giá chuyển hướng. Trong quá trình xây dựng mô hình, các đặc tính động lực học chủ yếu của toa xe được xem xét thông qua hệ thống treo sơ cấp và thứ cấp, các giảm chấn theo phương đứng và phương ngang, giảm chấn chống rắn bò. Biên dạng ban đầu của bánh xe được sử dụng là biên dạng mặt lăn thực tế, đường ray được mô hình hóa với biên dạng ray P43 sử dụng trên đường sắt Việt Nam, khổ đường 1.000 mm.

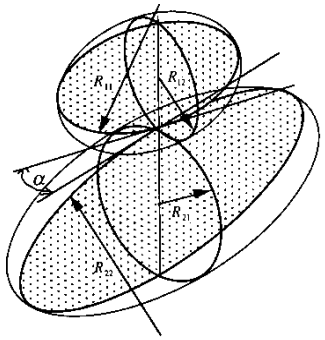


Hình 3. Mô hình động lực học toa xe khách

2.2. Lý thuyết tiếp xúc giữa bánh xe - ray

Năm 1881, Hertz tiến hành nghiên cứu về tiếp xúc của hai vật thể đàn hồi, đồng thời cho rằng, hai vật thể đàn hồi tiếp xúc với nhau thì hình dạng diện tích tiếp xúc là 1 elip. Khi hai vật thể đàn tính tiếp xúc, điểm tiếp xúc là O, có thể dùng hàm bậc 2 để biểu diễn bề mặt của hai vật thể đàn tính, hai bề mặt đó được biểu diễn như công thức 1 [9].

$$z_1 = f_1(x,y) \qquad z_2 = f_2(x,y) \qquad (1)$$



Hình 4. Bán kính tiếp xúc của hai vật thể đàn tính

Khoảng cách giữa 2 vật thể đàn tính theo phương pháp tuyến dùng công thức (2.2) biểu thị:

$$z_1 + z_2 = Ax^2 + By^2 \quad (2)$$

Trong đó:

A, *B*: hằng số

x, *y*: Trục dọc và trục ngang của hệ tọa độ.

Giá trị của A và B quyết định bởi đặc trưng tiếp xúc hình học và quan hệ tiếp xúc giữa hai vật thể đàn tính, nó được biểu thị như công thức (3)

$$\begin{cases} (A+B) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}}\right) \\ (B-A) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{12}}\right)\left(\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}}\right)\cos 2\alpha\right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

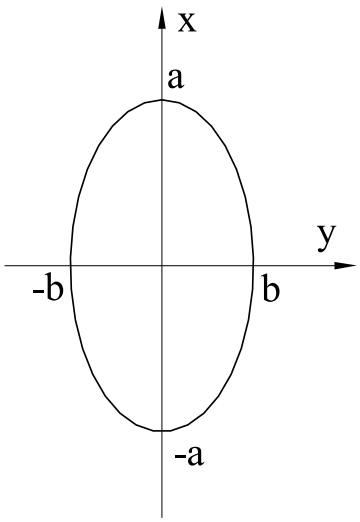
Trong đó:

$\frac{1}{R_{11}}, \frac{1}{R_{12}}$: Nghịch đảo bán kính theo phương x và phương y tại điểm tiếp xúc của vật thể đàn hồi thứ nhất.

$\frac{1}{R_{21}}, \frac{1}{R_{22}}$: Nghịch đảo bán kính theo phương x và phương y tại điểm tiếp xúc của vật thể đàn hồi thứ nhất.

α: Góc giữa 2 mặt phẳng tiếp tuyến của hai vật thể đàn tính tại điểm tiếp xúc.

Khi bánh xe và ray tiếp xúc với nhau, trục x là phương chuyển động của đầu máy, toa xe, trục vuông góc với trục x là trục y, góc α: bằng 0. R_{11} là bán kính vòng lăn của bánh xe tại điểm tiếp xúc, R_{12} bán kính bề mặt ngoài của mặt cắt ngang bánh xe, R_{21} là vô cùng lớn, R_{22} là bán kính bề mặt ngoài mặt cắt ngang của ray.



Hình 5. Hình dạng vết tiếp xúc của tiếp xúc Hertz

Nếu gọi a và b là hai bán trục của vùng tiếp xúc có dạng elip, có thể căn cứ công thức sau để tính toán phân bố lực tiếp xúc theo phương pháp tuyến:

$$p_z(x,y) = \frac{3}{2}\frac{N}{\pi ab}\sqrt{1-(\frac{x}{a})^2-(\frac{y}{b})^2} \quad (4)$$

Trong đó: N: Tải trọng theo phương pháp tuyến.

2.3. Phương pháp xác định hao mòn của Braghin

Braghin đã thực hiện các thí nghiệm hao mòn bánh xe - đường ray trên bệ thử và xây dựng mô hình dự đoán hao mòn mặt lăn bánh xe dựa trên dữ liệu thực nghiệm. Theo mô hình này, tại mỗi bước thời gian, vùng tiếp xúc bánh xe - đường ray được phân chia thành vùng nén và vùng trượt, tương ứng với diện tích As và Aa. Mô hình giả định rằng hao mòn bánh xe chỉ xảy ra tại vùng trượt, trong khi vùng nén được xem là không phát sinh hao mòn Với phần tử (i, j) bất kỳ thuộc vùng tiếp xúc, chiều sâu hao mòn được xác định theo biểu thức [5]:

$$\Delta z(i,j) = \begin{cases} k_B(i,j)\frac{V_v \Delta t(i,j)}{\rho} & (i,j) \in A_s \\ 0 & (i,j) \in A_a \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

$\Delta z(i,j)$: Chiều sâu hao mòn của phần tử *(i, j)*, mm;

V_v : Vận tốc đoàn tàu,m/s;

Δt : Thời gian bánh xe lăn qua phần tử (*i,j*), s;

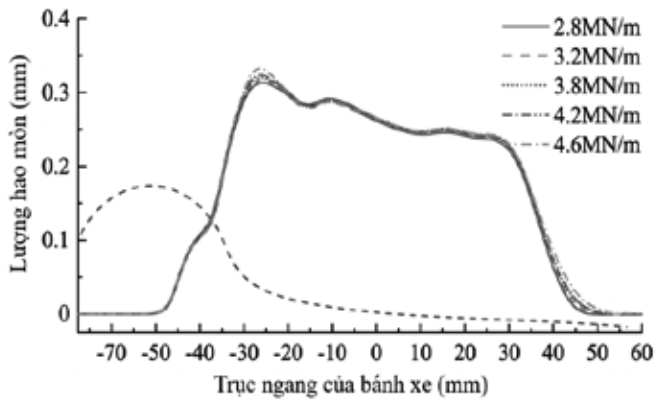
ρ : Khối lượng riêng của vật liệu bánh xe, kg/m^3;

$k_B(i,j)$: Hệ số hao mòn của phần tử, (*i, j*).

3. ẢNH HƯỞNG MỘT SỐ THAM SỐ ĐẾN HAO MÒN BÁNH XE

Dựa trên lưu đồ tính toán hao mòn bánh xe như Hình 1, mô hình đánh giá hao mòn được thành lập. Trên cơ sở mô hình này, các phân tích mô phỏng được tiến hành nhằm đánh giá mức độ và quy luật phân bố hao mòn bánh xe khi thay đổi các thông số chủ yếu của toa xe. Qua đó, mối quan hệ giữa các thông số thiết kế và khai thác với đặc tính hao mòn bánh xe được xác định, làm cơ sở lý thuyết và kỹ thuật cho việc lựa chọn, thiết kế và tối ưu hóa các thông số toa xe nhằm giảm thiểu hao mòn bánh xe.

3.1. Ảnh hưởng độ cứng hệ đàn hồi hộp trục theo phương thẳng đứng đến hao mòn bánh xe

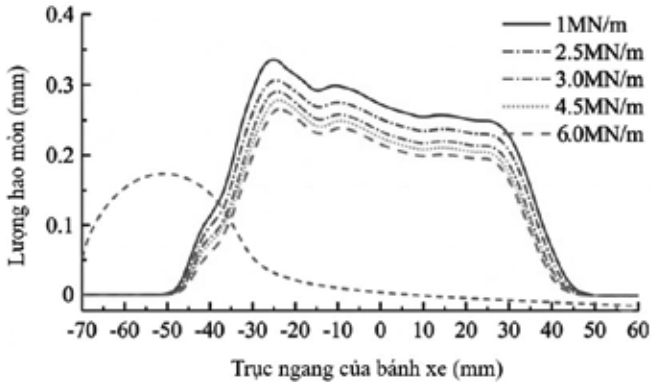


Hình 6. Độ cứng hệ đàn hồi hộp trục theo phương thẳng đứng và lượng hao mòn

Đối với độ cứng theo phương thẳng đứng của hệ thống đàn hồi hộp trục, các giá trị được lựa chọn để mô phỏng lần lượt là 2,8; 3,2; 3,8; 4,2 và 4,6 MN/m. Phân bố mài mòn bánh xe sau quãng đường vận hành 20.000 km được thể hiện trên Hình 6.

Từ Hình 6 có thể nhận thấy rằng độ cứng thẳng đứng theo phương thẳng đứng ảnh hưởng không đáng kể đến quá trình mài mòn bánh xe. Khi độ cứng theo phương thẳng đứng thay đổi trong phạm vi khảo sát, sự thay đổi của độ sâu mài mòn theo chu vi bánh xe tương đối nhỏ. Độ chênh lệch lớn nhất của độ sâu hao mòn chỉ khoảng 2,27%, cho thấy ảnh hưởng của thông số này đến mức độ mài mòn bánh xe là không đáng kể.

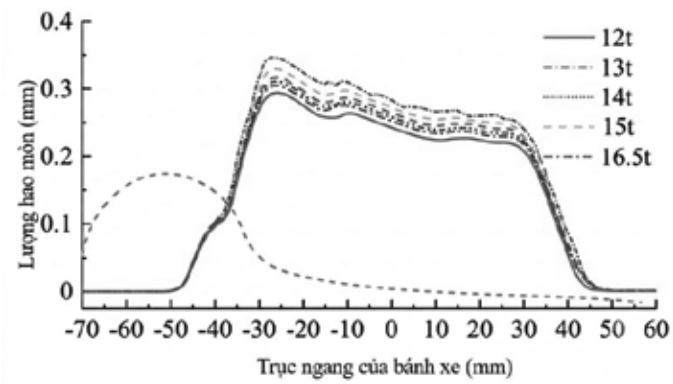
3.2. Ảnh hưởng độ cứng đàn hồi hộp trục theo phương ngang đến hao mòn bánh xe



Hình 7. Độ cứng hệ đàn hồi hộp trục theo phương ngang và lượng hao mòn

Kết quả trên Hình 7 cho thấy độ cứng theo phương ngang của hệ thống đàn hồi hộp trục có ảnh hưởng tương đối lớn đến hao mòn bánh xe. Khi độ cứng theo phương ngang ngang tăng từ 1,0 lên 6,0 MN/m, sau khi toa xe vận hành 20.000 km độ sâu hao mòn theo chu vi bánh xe lần lượt đạt 0,292; 0,262; 0,232; 0,2319 và 0,227 mm. Độ chênh lệch lớn nhất giữa các trường hợp là 24%, cho thấy sự thay đổi độ cứng ngang trong phạm vi khảo sát làm thay đổi đáng kể mức độ cũng như quy luật phân bố mài mòn bánh xe.

3.3. Ảnh hưởng tải trọng trục đến đến hao mòn bánh xe



Hình 8. Tải trọng trục và lượng hao mòn

Để nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng trục đến đặc tính mài mòn bánh xe toa xe, tiến hành mô phỏng quá trình hao mòn bánh xe với các giá trị tải trọng trục lần lượt là 12; 13; 14; 15 và 16,5 tấn. Hình 8 thể hiện sự thay đổi của phân bố độ sâu hao mòn trên bánh xe theo tải trọng trục sau khi toa xe vận hành được 20.000 km.

Từ kết quả thể hiện trên Hình 8 có thể thấy rằng, trong cùng một quãng đường vận hành, độ sâu mài mòn theo chu vi của bánh xe có xu hướng tăng rõ rệt khi tải trọng trục tăng. Khi tải trọng trục bằng 12 tấn, độ sâu mài mòn theo chu vi trên mặt lăn bánh xe đạt 0,243 mm. Khi tải trọng trục tăng lên lần lượt 13; 14; 15 và 16,5 tấn, độ sâu mài mòn tương ứng đạt 0,253; 0,273; 0,289 và 0,3317 mm. Như vậy tải trọng tăng từ 12t lên 16,5t thì hao mòn tăng khoảng 20%. Kết quả cũng cho thấy phạm vi phân bố mài mòn trên mặt lăn có xu hướng mở rộng khi tải trọng trục tăng.

Mặt khác, có thể nhận thấy ảnh hưởng của tải trọng trục đến mài mòn mặt lăn lớn hơn đáng kể so với mài mòn tại khu vực vành bánh. Trong phạm vi tải trọng trục được khảo sát, sự thay đổi độ sâu mài mòn tại vành bánh tương đối nhỏ. Điều này cho thấy tải trọng trục chủ yếu ảnh hưởng đến quá trình mài mòn thông qua sự gia tăng lực tương tác bánh - ray và công suất tiêu hao do tiếp xúc, trượt, từ đó làm gia tăng mức độ mài mòn trên mặt lăn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày mô hình đánh giá hao mòn bánh xe của đầu máy căn cứ vào mô hình tiếp xúc, mô hình động lực học và phương pháp đánh giá hao mòn của Braghin. Ứng dụng mô hình này để đánh giá ảnh hưởng của độ cứng hệ thống treo hộp trục và tải trọng trục đến hao mòn bánh xe.

Mô hình này có thể ứng dụng để đánh giá hao mòn bánh xe cho các toa xe khác nhau, đồng thời ứng dụng để nghiên cứu các nhân tố khác như: điều kiện vận hành, tham số kỹ thuật của đường ray... ảnh hưởng đến hao mòn bánh xe.

Lời cảm ơn: Tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Giao thông vận tải đã tài trợ kinh phí để nghiên cứu được thực hiện thông qua đề tài mã số T2026-CK-010.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Jendel T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with filed measurements. Wear, vol. 253, no. 1, pp. 89-99, 2002.

[2] Ward A, Lewis R. Incorporating a Railway Wheel Wear Model into Multi-Body Simulation of wheel set Dynamic. In: proceedings or the 29th Leeds-Lyon symposium on Teratology, 2003.

[3] Kevin S, WU H M. The formation of hollow worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, vol. 258, no. 7-8, pp. 1179-1186, 2005.

[4] Zobory I. Prediction of wheel/rail profile wear. Vehicle System Dynamic, vol. 28, no. 2, pp. 221-259, 1997.

[5] BRAGHIN F, Lewis R, Dwyer R S. A Mathematical Model to Predict Railway Wheel Profile Evolution Due to Wear. Wear, vol. 261, no. 11, pp. 1253-1264, 2006.

[6] Nguyễn Đạt Tường. Lựa chọn lò xo không khí cho giá chuyển hướng toa xe khách Việt Nam. Luận văn Thạc sỹ, 2007.

[7] 缪炳荣. SIMPACK 动力学分析高级教程（铁道车辆. 成都：西南交通大学出版社，2010.

[8] 王天福. 车辆系统动力学。北京，中国铁道出版社，1995.

[9] Hertz H. On the contact of elastic solids. Reine und angewandte Mathematik, vol. 92, pp. 156-171, 1882.

■Ngày nhận bài 15/9/2026 ■Ngày sửa bài: 25/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2026

Lựa chọn công nghệ và các rủi ro đối với quản lý chất lượng xây dựng cống vùng triều lớn ở Việt Nam

Technology selection and risks to quality management in the construction of large tidal estuary dams in Vietnam

> THÁI QUỐC HIỀN[1,2], PGS.TS MAI SỸ HÙNG[3,*]
[1]NCS Trường Đại học Thủy lợi
[2]Viện Thủy Công - Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam
[3]Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: hungms@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Lựa chọn công nghệ có ảnh hưởng quan trọng đến quản lý chất lượng xây dựng cống vùng triều (CVT) lớn ở Việt Nam. Bài báo phân tích ba nhóm công nghệ chủ yếu, gồm công nghệ truyền thống, công nghệ truyền thống cải tiến và công nghệ đập trụ đỡ; đồng thời làm rõ ảnh hưởng của đặc điểm kết cấu, điều kiện nền móng, điều kiện thi công và nhiệm vụ khai thác đến việc lựa chọn công nghệ. Kết quả phân tích cho thấy mỗi công nghệ có những ưu điểm, hạn chế và phạm vi áp dụng riêng. Việc lựa chọn không phù hợp có thể làm gia tăng rủi ro về kết cấu, nền móng, chống thấm, công trình tạm, tiêu năng và vận hành, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và hiệu quả khai thác công trình. Bài báo đề xuất cần đánh giá tổng hợp các điều kiện kỹ thuật và tích hợp quản lý rủi ro ngay từ giai đoạn khảo sát, thiết kế, lựa chọn công nghệ đến thi công nhằm nâng cao chất lượng xây dựng CVT lớn.

Từ khóa: Cống vùng triều lớn; lựa chọn công nghệ; quản lý chất lượng; rủi ro xây dựng; đập trụ đỡ.

ABSTRACT

Technology selection plays an important role in quality management for the construction of large tidal estuary dams in Vietnam. This paper examines three main construction technologies: traditional technology, improved traditional technology, and the Tru Do Dam technology. It analyzes the influence of structural characteristics, foundation conditions, construction constraints, and operational requirements on technology selection. The analysis indicates that each technology has specific advantages, limitations, and applicability. Inappropriate selection may increase risks related to structural stability, foundations, seepage control, temporary works, energy dissipation, and operation, thereby affecting construction quality and long-term performance. The paper recommends an integrated assessment of technical conditions and the incorporation of risk management throughout site investigation, design, technology selection, and construction to improve the quality, safety, and operational efficiency of large tidal sluices in Vietnam.

Keywords: Large tidal estuary dams; technology selection; quality management; construction risks; Tru Do Dam technology

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

CVT lớn là loại công trình thủy lợi có vai trò quan trọng trong kiểm soát xâm nhập mặn, điều tiết nguồn nước, tiêu thoát lũ và bảo vệ các vùng sản xuất, dân cư ven biển. Trong những năm gần đây, cùng với yêu cầu thích ứng biến đổi khí hậu và phát triển kinh tế - xã hội tại các vùng cửa sông, quy mô và nhiệm vụ của các công trình CVT ngày càng được mở rộng. Nhiều công trình phải bảo đảm đồng thời khả năng ngăn mặn, giữ ngọt, tiêu thoát nước với lưu lượng lớn và duy trì giao thông thủy.

Khác với các cống xây dựng trên hệ thống kênh, sông nội đồng, CVT lớn thường được bố trí tại các cửa sông có lòng sông rộng, cột nước sâu, nền địa chất phức tạp và chế độ thủy văn chịu ảnh hưởng mạnh của thủy triều. Đặc biệt, yêu cầu duy trì khả năng tiêu thoát nước của lưu vực và bảo đảm tĩnh không cho tàu thuyền đặt ra những ràng buộc đáng kể đối với khẩu độ thoát nước, kết cấu trụ pin, tháp van, nền móng và biện pháp tổ chức thi công. Vì vậy, lựa chọn công nghệ xây dựng phù hợp có ý nghĩa quyết định đối với tính khả thi, chất lượng và hiệu quả khai thác công trình.

Thực tế xây dựng ở Việt Nam đã hình thành các nhóm công nghệ chủ yếu gồm công nghệ truyền thống, công nghệ truyền thống cải tiến và công nghệ đập trụ đỡ. Mỗi công nghệ có những ưu điểm và hạn chế riêng về sơ đồ kết cấu, giải pháp nền móng, khả năng mở rộng khẩu độ, tổ chức thi công và tiêu năng. Trong điều kiện xây dựng cống ngày càng lớn, một số hạn chế của công nghệ truyền thống và truyền thống cải tiến bộc lộ rõ hơn, đặc biệt về phạm vi công trình tạm, khả năng bố trí tháp van khi phải bảo đảm thông thuyền và mức độ chiếm dụng mặt cắt dòng chảy. Công nghệ đập trụ đỡ có nhiều lợi thế về kết cấu gọn, khẩu độ lớn và bố trí thiết bị, nhưng cũng đặt ra yêu cầu nghiên cứu giải pháp tiêu năng khi công trình làm việc với chênh lệch mực nước lớn.

Thực tế đó cho thấy, lựa chọn công nghệ không thể chỉ căn cứ vào ưu điểm kết cấu hoặc chi phí đầu tư ban đầu, mà cần xem xét tổng hợp sự phù hợp giữa công nghệ với điều kiện địa chất, thủy văn, yêu cầu thi công và nhiệm vụ khai thác. Việc lựa chọn không phù hợp có thể làm phát sinh rủi ro về ổn định kết cấu, nền móng, công trình tạm, chất lượng thi công và an toàn vận hành.

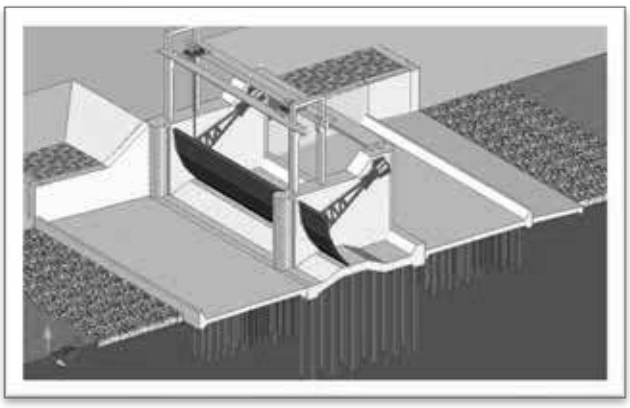
Bài báo tập trung phân tích các công nghệ xây dựng CVT lớn ở Việt Nam, làm rõ ảnh hưởng của điều kiện kết cấu, nền móng, thi công và nhiệm vụ khai thác đến lựa chọn công nghệ; từ đó nhận diện các rủi ro chủ yếu và đề xuất định hướng cải tiến kết cấu, kiểm soát rủi ro nhằm nâng cao chất lượng xây dựng công trình.

2. TỔNG QUAN CÁC CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG CVT LỚN Ở VIỆT NAM

Ở Việt Nam, các công trình CVT lớn xây dựng sau năm 2000 chủ yếu được xây dựng theo công nghệ đập trụ đỡ, một số ít theo công nghệ truyền thống và công nghệ truyền thống cải tiến. Mỗi công nghệ có đặc điểm riêng về kết cấu, nền móng, khả năng mở rộng khẩu độ và tổ chức thi công.

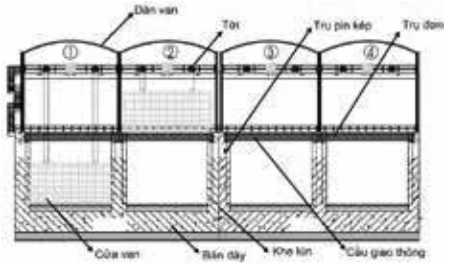
2.1. Công nghệ truyền thống

Cống truyền thống có kết cấu cơ bản gồm bản đáy có chiều dày khoảng 0,8 - 1,5 m bằng bê tông cốt thép đổ liền khối với trụ pin, cửa van và hệ thống tiêu năng, gia cố lòng dẫn. Móng cống dạng móng bè hoặc móng cọc tùy điều kiện địa chất. Chống thấm chủ yếu dựa vào đường viền thấm ngang; tiêu năng được thực hiện bằng bể và sân sau. Với công trình có tổng chiều rộng lớn, có thể chia thành các phân đoạn độc lập tại vị trí trụ pin kép tạo thành khe lún.



Hình 1. Mô hình kết cấu cống truyền thống

Ưu điểm của công nghệ này là kết cấu quen thuộc, có nhiều kinh nghiệm thiết kế, thi công và khả năng bố trí hệ thống tiêu năng tương đối hoàn chỉnh. Tuy nhiên, bản đáy và hệ thống tiêu năng thường có quy mô lớn, làm tăng khối lượng xây dựng và diện tích thi công. Đối với sông rộng, nước sâu và nền đất yếu, việc xây dựng đê quai hoặc khung vây phục vụ thi công có thể gặp nhiều khó khăn, chiếm dụng mặt cắt dòng chảy và làm tăng rủi ro đối với công trình tạm.



Hình 2. Hình cắt ngang sông cống truyền thống cổ điển

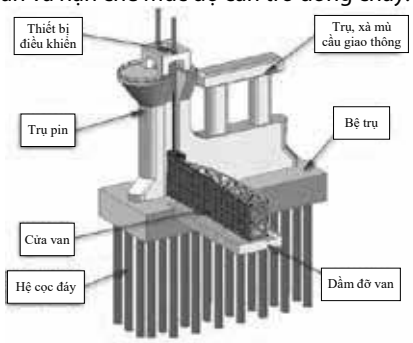
2.2. Công nghệ truyền thống cải tiến

Công nghệ truyền thống cải tiến về cơ bản vẫn giữ sơ đồ kết cấu như cống truyền thống gồm bản đáy và trụ pin đổ liền khối tạo thành hệ thống tiêu năng ngay trong lòng cống nhưng cải tiến biện pháp tổ chức thi công, đặc biệt là sử dụng khung vây cọc ván thép thay cho đê quai đất có phạm vi lớn. Giải pháp này có thể thu hẹp phạm vi công trình do không có sân tiêu năng ngoài thân cống và do vậy thuận lợi hơn trong điều kiện thi công trên sông có mực nước sâu và chịu ảnh hưởng thủy triều.

Tuy nhiên, công nghệ cải tiến chưa làm thay đổi căn bản đặc điểm kết cấu của cống truyền thống. Việc thi công vẫn phụ thuộc vào khả năng ổn định khung vây, xử lý thấm, chống đỡ và trình tự đào móng, đổ bê tông bản đáy. Do đó, hiệu quả của giải pháp phụ thuộc đáng kể vào điều kiện địa chất, thủy văn và phương án tổ chức thi công cụ thể.

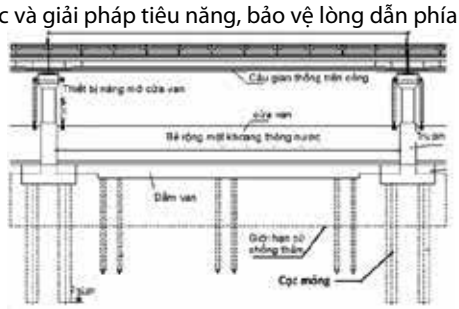
2.3. Công nghệ đập trụ đỡ

Công nghệ đập trụ đỡ có kết cấu gồm các trụ bê tông cốt thép độc lập, liên kết với nhau bằng dầm van; trụ được đặt trên nền cọc và kết hợp hệ thống cọc ván thép chống thấm. Một số dạng kết cấu sử dụng thân trụ làm bộ phận liên kết và truyền tải trọng xuống hệ cọc. Công nghệ này cho phép bố trí khẩu độ lớn, giảm số lượng trụ trong lòng dẫn và hạn chế mức độ cản trở dòng chảy.



Hình 3. Mô hình đập trụ đỡ bệ thấp

Ưu điểm nổi bật là kết cấu gọn, thuận lợi bố trí thiết bị đóng mở và có khả năng thi công theo từng trụ, trong một số điều kiện không cần ngăn dòng toàn bộ. Tuy nhiên, công nghệ này đặt ra yêu cầu cao về chất lượng thi công cọc, độ chính xác định vị trụ, liên kết dầm van, khả năng chống thấm và bảo vệ chống xói. Đặc biệt, khi công trình làm việc với chênh lệch mực nước lớn, cần nghiên cứu kỹ chế độ thủy lực và giải pháp tiêu năng, bảo vệ lòng dẫn phía hạ lưu.



Hình 4. Cắt dọc một khoang cống đập trụ đỡ

2.4. Nhận xét chung

Ba nhóm công nghệ có sự khác biệt rõ rệt về sơ đồ kết cấu và tổ chức thi công. Công nghệ truyền thống có ưu thế về kinh nghiệm thiết kế, thi công và giải pháp tiêu năng; công nghệ truyền thống cải tiến khắc phục một phần khó khăn về công trình tạm; trong khi công nghệ đập trụ đỡ có lợi thế về khẩu độ, kết cấu gọn và khả năng hạn chế cản trở dòng chảy.

Đối với CVT lớn xây dựng trên các sông rộng, nước sâu, nền đất yếu và có yêu cầu thông thuyền, việc lựa chọn công nghệ cần được xem xét tổng hợp trên cơ sở điều kiện địa chất, thủy văn, nhiệm vụ khai thác và khả năng tổ chức thi công. Không có một công nghệ phù hợp cho mọi điều kiện công trình; lựa chọn không phù hợp có thể làm gia tăng rủi ro về nền móng, kết cấu, công trình tạm và chất lượng xây dựng.

3. ẢNH HƯỞNG CỦA ĐẶC ĐIỂM KẾT CẤU VÀ NỀN MÓNG ĐẾN LỰA CHỌN CÔNG NGHỆ

3.1. Ảnh hưởng của sơ đồ kết cấu và khả năng mở rộng khẩu độ

Khẩu độ thoát nước khi có yêu cầu thông thuyền là một trong những yếu tố quan trọng chi phối lựa chọn công nghệ xây dựng CVT lớn. Khi yêu cầu khẩu độ tăng, kích thước và sơ đồ bố trí trụ, bản đáy, dầm van cũng như hệ thống tiêu năng có những thay đổi đáng kể.

Đối với công nghệ truyền thống, việc mở rộng công trình thường gắn với sự gia tăng kích thước bản đáy, hệ thống tiêu năng và quy mô kết cấu. Công trình có tổng chiều rộng lớn có thể được phân chia thành các đoạn độc lập nhằm hạn chế ảnh hưởng của biến dạng không đều. Tuy nhiên trong một số trường hợp, việc bố trí trụ pin và tháp van kép cao với khe lún giữa các đoạn yêu cầu làm tăng yêu cầu kiểm soát chặt chẽ lún lệch và khả năng chống thấm tại các vị trí tiếp giáp.

Trong khi đó, công nghệ đập trụ đỡ sử dụng các trụ độc lập liên kết bằng dầm van, tạo điều kiện bố trí khẩu độ lớn và giảm số lượng trụ trong lòng dẫn. Đây là lợi thế đáng kể đối với các công trình cần bảo đảm khả năng tiêu thoát lũ và giao thông thủy. Tuy nhiên, khi khẩu độ tăng, tải trọng tác dụng lên trụ, dầm van và hệ móng cũng thay đổi; việc kiểm soát biến dạng, ổn định tổng thể và chất lượng liên kết giữa các bộ phận trở nên quan trọng hơn.

Như vậy, khả năng mở rộng khẩu độ không chỉ phụ thuộc vào khả năng chịu lực của kết cấu mà còn liên quan đến tính hợp lý của sơ đồ kết cấu, giải pháp nền móng và điều kiện thi công.

3.2. Ảnh hưởng của điều kiện địa chất và giải pháp nền móng

CVT lớn thường được xây dựng tại khu vực cửa sông, nơi địa tầng có thể gồm các lớp đất yếu, chiều dày lớn và biến đổi phức tạp theo không gian. Điều kiện này ảnh hưởng trực tiếp đến lựa chọn loại móng, khả năng chịu tải, độ lún và ổn định của công trình.

Với công nghệ truyền thống, bản đáy có diện tích lớn, tải trọng công trình được truyền xuống nền thông qua móng bè hoặc hệ cọc. Trong trường hợp nền yếu, giải pháp móng cọc thường được xem xét để bảo đảm khả năng chịu lực và hạn chế lún. Tuy nhiên, diện tích bản đáy lớn cùng yêu cầu xử lý nền và chống thấm có thể làm tăng khối lượng thi công dưới nước hoặc trong phạm vi khung vây.

Đối với công nghệ đập trụ đỡ, tải trọng tập trung chủ yếu truyền qua các trụ xuống hệ cọc móng. Giải pháp này có thể giảm phạm vi kết cấu bản đáy, nhưng làm tăng yêu cầu đối với chất lượng cọc, khả năng chịu tải của nhóm cọc và kiểm soát chuyển vị của trụ. Đặc biệt, tải trọng ngang do chênh lệch mực nước, dòng chảy và quá trình vận hành cửa van cần được xem xét trong tính toán nền móng.

Bên cạnh khả năng chịu lực, điều kiện địa chất còn ảnh hưởng đến giải pháp chống thấm và chống xói. Việc bố trí cọc ván thép, tường chống thấm hoặc các kết cấu bảo vệ lòng dẫn cần phù hợp với địa tầng, chiều sâu lớp đất thấm và chế độ thủy lực tại vị trí công trình. Nếu đánh giá chưa đầy đủ các yếu tố này, công trình có thể phát sinh thấm qua nền, xói ngầm, lún không đều hoặc mất ổn định cục bộ.

3.3. Rủi ro khi lựa chọn công nghệ không phù hợp

Từ đặc điểm kết cấu và nền móng có thể nhận diện một số nhóm rủi ro chủ yếu trong lựa chọn công nghệ xây dựng CVT lớn:

- **Rủi ro về kết cấu:** Sơ đồ kết cấu không phù hợp với khẩu độ và tải trọng có thể làm tăng nội lực, biến dạng, gây khó khăn trong bố trí trụ, dầm van và thiết bị đóng mở.
- **Rủi ro về nền móng:** Đánh giá chưa đầy đủ địa tầng, sức chịu tải, độ lún và tải trọng ngang có thể dẫn đến lún không đều, chuyển vị trụ hoặc suy giảm ổn định công trình.
- **Rủi ro về chống thấm và chống xói:** Giải pháp chống thấm không phù hợp với điều kiện địa chất và thủy lực có thể gây thấm tập trung, xói ngầm hoặc xói cục bộ ở khu vực chân công trình.
- **Rủi ro về chất lượng thi công:** Công nghệ đòi hỏi kỹ thuật thi công phức tạp nhưng không phù hợp với năng lực thiết bị, nhân lực và điều kiện hiện trường có thể làm tăng sai sót trong thi công cọc, kết cấu bê tông và các mối nối.

Do đó, lựa chọn công nghệ cần được thực hiện trên cơ sở đánh giá đồng thời khẩu độ, sơ đồ kết cấu, điều kiện địa chất và yêu cầu chịu lực của nền móng. Đây không chỉ là quyết định về giải pháp thiết kế mà còn là bước kiểm soát rủi ro có ảnh hưởng xuyên suốt đến chất lượng thi công và độ an toàn của công trình.

4. ĐIỀU KIỆN THI CÔNG TRÊN SÔNG LỚN VÀ RỦI RO DO LỰA CHỌN CÔNG NGHỆ

4.1. Đặc điểm điều kiện thi công

CVT lớn thường được xây dựng trên các sông có lòng dẫn rộng, mực nước sâu, dòng chảy chịu ảnh hưởng của thủy triều và có yêu cầu duy trì khả năng tiêu thoát nước trong quá trình thi công. Một số vị trí còn có hoạt động giao thông thủy với yêu cầu về chiều rộng luồng và tĩnh không thông thuyền. Những điều kiện này gây khó khăn cho việc bố trí mặt bằng, dẫn dòng, ngăn dòng và tổ chức thi công các hạng mục dưới nước.

Đối với công nghệ truyền thống, việc thi công bản đáy và các kết cấu liên quan thường cần phạm vi ngăn dòng tương đối lớn. Đê quai đất có thể gặp hạn chế khi mực nước sâu, dòng chảy mạnh hoặc mặt cắt sông không cho phép thu hẹp dòng dẫn. Việc chuyển sang khung vây cọc ván thép giúp thu hẹp phạm vi công trình tạm nhưng vẫn đòi hỏi giải pháp chống thấm, chống đỡ và kiểm soát ổn định khung vây phù hợp.

Công nghệ đập trụ đỡ có lợi thế trong việc thi công các trụ độc lập, có thể hạn chế phạm vi ngăn dòng và trong một số điều kiện cho phép duy trì dòng chảy qua khu vực thi công. Tuy nhiên, thi công cọc và trụ trong môi trường nước sâu, dòng chảy và thủy triều phức tạp đòi hỏi thiết bị chuyên dụng, định vị chính xác và kiểm soát chặt chẽ chất lượng thi công.

4.2. Rủi ro từ công trình tạm và tổ chức thi công

Lựa chọn công nghệ không phù hợp với điều kiện hiện trường có thể làm gia tăng quy mô và mức độ phức tạp của công trình tạm. Đối với phương án sử dụng đê quai hoặc khung vây, các rủi ro chủ yếu liên quan đến mất ổn định, thấm qua nền, xói chân và biến dạng kết cấu chống đỡ. Sự cố công trình tạm không chỉ ảnh hưởng đến tiến độ mà còn có thể gây hư hỏng các hạng mục đang thi công và mất an toàn lao động.

Đối với phương án thi công cọc và trụ trong điều kiện dòng chảy, rủi ro tập trung vào sai lệch vị trí, độ nghiêng cọc, chất lượng thân cọc và khó khăn trong kiểm soát điều kiện thi công dưới nước. Những sai sót này có thể ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu lực và độ chính xác lắp đặt các kết cấu phía trên.

Ngoài ra, biến động thủy triều, mưa lũ và sự thay đổi dòng chảy theo mùa có thể làm gián đoạn trình tự thi công, ảnh hưởng đến chất lượng bê tông, công tác đào móng, xử lý nền và lắp đặt thiết bị. Vì vậy, phương án công nghệ cần được xem xét đồng thời với biện pháp thi công và điều kiện thủy văn trong toàn bộ thời gian xây dựng.

4.3. Yêu cầu kiểm soát rủi ro trong lựa chọn công nghệ

Để hạn chế rủi ro trong thi công CVT lớn, việc lựa chọn công nghệ cần gắn với đánh giá khả năng dẫn dòng, phạm vi ngăn dòng, điều kiện ổn định công trình tạm và năng lực thiết bị thi công. Đặc biệt, cần xem xét ảnh hưởng của phương án thi công đến mặt cắt thoát lũ và giao thông thủy, tránh lựa chọn giải pháp có thể gây cản trở đáng kể dòng chảy trong thời gian dài.

Đối với công trình sử dụng khung vây cọc ván thép, cần kiểm soát ổn định tổng thể, thấm, xói và hệ thống chống đỡ. Đối với công trình sử dụng móng cọc trong điều kiện nước sâu, cần kiểm soát chặt chẽ định vị, độ nghiêng, chất lượng cọc và khả năng liên kết với kết cấu trụ.

Như vậy, biện pháp thi công không nên được xem là nội dung triển khai sau khi đã lựa chọn công nghệ, mà cần được xem xét ngay từ giai đoạn nghiên cứu phương án. Sự phù hợp giữa công nghệ kết cấu và điều kiện thi công là yếu tố quan trọng nhằm hạn chế rủi ro, bảo đảm chất lượng và tiến độ xây dựng CVT lớn.

5. ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆM VỤ KHAI THÁC ĐẾN LỰA CHỌN CÔNG NGHỆ

5.1. Yêu cầu tiêu thoát lũ và kiểm soát triều

CVT lớn thường đảm nhận đồng thời nhiều nhiệm vụ như tiêu thoát lũ, ngăn mặn, giữ ngọt và điều tiết mực nước. Trong đó, yêu cầu tiêu thoát lũ với lưu lượng lớn đòi hỏi công trình có khẩu độ thông nước phù hợp, hạn chế tổn thất cột nước và giảm mức độ cản trở dòng chảy.

Đối với công nghệ truyền thống, hệ thống bản đáy, trụ pin và bể tiêu năng tạo thành kết cấu tương đối hoàn chỉnh, thuận lợi cho việc kiểm soát dòng chảy qua công trình. Tuy nhiên, khi yêu cầu khẩu độ lớn và hạn chế cản trở dòng chảy tăng lên, số lượng trụ, kích thước kết cấu và phạm vi công trình có thể trở thành những yếu tố bất lợi.

Công nghệ đập trụ đỡ có ưu thế về khả năng bố trí khẩu độ lớn, giảm số lượng trụ và hạn chế chiếm dụng mặt cắt dòng chảy. Tuy nhiên, khi công trình phải vận hành với chênh lệch mực nước lớn, cần đặc biệt quan tâm đến vận tốc dòng chảy, chế độ thủy lực qua cửa van, xói hạ lưu và khả năng tiêu năng. Vì vậy, ưu thế về khẩu độ cần được xem xét đồng thời với yêu cầu bảo đảm an toàn thủy lực.

5.2. Yêu cầu giao thông thủy và bố trí thiết bị vận hành

Tại các cửa sông có hoạt động giao thông thủy, công trình phải bảo đảm chiều rộng khoang thông thuyền và tĩnh không theo yêu cầu khai thác. Đây là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chiều cao trụ, vị trí dầm van, tháp van và thiết bị đóng mở.

Với công nghệ truyền thống, việc bố trí cửa van và thiết bị nâng hạ trong điều kiện phải bảo đảm tĩnh không thông thuyền có thể làm tăng chiều cao kết cấu phía trên. Khi kết hợp với trụ pin kép và các đoạn công trình độc lập, sơ đồ kết cấu có thể trở nên phức tạp hơn.

Công nghệ đập trụ đỡ có lợi thế trong việc bố trí thiết bị đóng mở trên các trụ độc lập, tạo điều kiện tổ chức kết cấu gọn và mở rộng khẩu độ thông thuyền. Tuy nhiên, việc lựa chọn cửa van, thiết bị nâng hạ và giải pháp bảo vệ kết cấu vẫn phải đáp ứng yêu cầu chịu lực, độ bền và khả năng vận hành trong môi trường cửa sông chịu ảnh hưởng của thủy triều và xâm thực.

5.3. Rủi ro trong vận hành và yêu cầu lựa chọn công nghệ

Nhiệm vụ khai thác không phù hợp với đặc điểm công nghệ có thể làm phát sinh rủi ro trong quá trình vận hành. Khẩu độ không đáp ứng yêu cầu tiêu thoát có thể gây gia tăng mực nước thượng lưu; kết cấu trụ và thiết bị đóng mở không phù hợp có thể ảnh hưởng đến khả năng vận hành cửa van. Đặc biệt, chế độ vận hành với chênh lệch mực nước lớn có thể làm tăng nguy cơ xói cục bộ và ảnh hưởng đến ổn định công trình.

Bên cạnh đó, công trình vùng triều thường xuyên chịu tác động của môi trường nước mặn, bồi lấp bùn cát và các yếu tố ăn mòn. Do đó, lựa chọn vật liệu, kết cấu bảo vệ, cửa van và thiết bị cơ khí cũng như giải pháp bảo trì cần được xem xét ngay từ giai đoạn thiết kế công nghệ.

Như vậy, lựa chọn công nghệ xây dựng CVT lớn cần xuất phát từ nhiệm vụ khai thác lâu dài, không chỉ đáp ứng yêu cầu xây dựng trước mắt. Các chỉ tiêu về năng lực tiêu thoát, khả năng thông thuyền, an toàn thủy lực, độ bền kết cấu và thuận lợi trong vận hành, bảo trì cần được xem xét đồng bộ để hạn chế rủi ro và bảo đảm chất lượng công trình trong suốt thời gian sử dụng.

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1. Kết luận

Lựa chọn công nghệ có vai trò quan trọng đối với chất lượng xây dựng CVT lớn ở Việt Nam. Qua phân tích ba nhóm công nghệ chủ yếu gồm công nghệ truyền thống, công nghệ truyền thống cải tiến và công nghệ đập trụ đỡ cho thấy mỗi công nghệ có những ưu điểm, hạn chế và phạm vi phù hợp riêng.

Đối với các công trình có khẩu độ lớn, xây dựng trên sông rộng, nước sâu, nền địa chất phức tạp và có yêu cầu thông thuyền, việc lựa chọn công nghệ cần được xem xét đồng bộ trên các phương diện: sơ đồ kết cấu, giải pháp nền móng, điều kiện thi công và nhiệm vụ khai thác. Nếu chỉ tập trung vào ưu điểm của một công nghệ mà chưa đánh giá đầy đủ các điều kiện thực tế, công trình có thể phát sinh rủi ro về ổn định kết cấu, nền móng, chống thấm, công trình tạm, tiêu năng và vận hành.

Như vậy, rủi ro trong lựa chọn công nghệ không chỉ ảnh hưởng đến giải pháp thiết kế mà còn tác động xuyên suốt đến chất lượng thi công, tiến độ, an toàn và hiệu quả khai thác công trình. Do đó, lựa chọn công nghệ cần được xem là một nội dung quan trọng trong quản lý chất lượng xây dựng CVT lớn.

6.2. Kiến nghị

Cần đánh giá tổng hợp điều kiện địa chất, thủy văn, quy mô khẩu độ, yêu cầu giao thông thủy và nhiệm vụ khai thác ngay từ giai đoạn nghiên cứu lựa chọn phương án. Việc so sánh công nghệ cần xét đến không chỉ chi phí đầu tư mà cả tính khả thi thi công, rủi ro kỹ thuật và chi phí vận hành, bảo trì.

Đối với công nghệ đập trụ đỡ, cần tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện giải pháp kết cấu và tiêu năng, đặc biệt trong điều kiện công trình làm việc với chênh lệch mực nước lớn. Các phương án cải tiến kết cấu cần được kiểm chứng về thủy lực, ổn định, chống thấm và biến dạng trước khi áp dụng thực tế.

Đồng thời, cần tích hợp quản lý rủi ro vào các giai đoạn khảo sát, thiết kế, lựa chọn nhà thầu và thi công; xác định các điểm kiểm soát chất lượng trọng yếu tương ứng với từng công nghệ. Đây là cơ sở để chủ động phòng ngừa sai sót, hạn chế sự cố và nâng cao chất lượng xây dựng CVT lớn ở Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thái Quốc Hiển, Nguyễn Hữu Huế. Nguyên nhân và giải pháp hạn chế sự cố trong xây dựng cống vùng triều lớn ở Việt Nam. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, số 83, tr. 31-40. 2024.

[2] Bùi Quang Nhung. Ứng dụng công nghệ đập Trụ đỡ trong thiết kế công trình cống Kinh Lộ thuộc dự án chống ngập úng khu vực TP.HCM. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường số 33, tr. 61-64, tháng 6/2011.

[3] Trần Đình Hòa. Hiệu quả khoa học và công nghệ nổi bật trong Dự án hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, số 5A, tr. 27-30, 2022.

[4] Trần Minh Thái, Nguyễn Tài Thành, Dương Ngọc Hùng. Công nghệ đập Trụ đỡ và triển vọng ứng dụng trong xây dựng công trình ngăn sông vùng ven biển miền Trung. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, số 51, tr. 43-47, 2018.

[5] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 4116:2023 - Công trình thủy lợi - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép thủy công - Yêu cầu thiết kế, 2023.

[6] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13718:2023 - Công trình thủy lợi - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép thủy công - Yêu cầu thi công và nghiệm thu, 2023.

[7] Chính phủ. Nghị định số 207/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng, 2026.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/10/2026

Các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại tỉnh Lào Cai

Factors affecting the construction management in Lao Cai province

> HOÀNG VIỆT ANH[1], NGUYỄN THỊ THÚY[2,*]
[1]Viện Kiến trúc Quy hoạch xây dựng tỉnh Lào Cai
[2]Khoa Kinh tế và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: thuynt3@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Quản lý trật tự xây dựng đóng vai trò quan trọng trong việc chuyển các yêu cầu, nội dung trên hồ sơ quy hoạch thành trạng thái không gian trên thực địa. Lào Cai là một tỉnh vùng cao biên giới, việc quản lý trật tự xây dựng đô thị do đó sẽ có những đặc điểm và thách thức riêng. Nghiên cứu này tập trung đánh giá các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại tỉnh Lào Cai. Số liệu được thu thập từ 67 cán bộ, người lao động đang công tác tại Lào Cai. Kết quả cho thấy 08 nhân tố xem xét đều có mức ảnh hưởng cao tới công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị. Các nhân tố này gồm cả các nhân tố chủ quan và khách quan, đồng thời cũng liên quan tới nhiều chủ thể khác nhau như cơ quan quản lý nhà nước, chủ đầu tư, đơn vị thi công, cộng đồng dân cư. Điều này cho thấy mức độ khó khăn trong công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại Lào Cai.

Từ khóa: Nhân tố ảnh hưởng; trật tự xây dựng đô thị; đô thị; Lào Cai.

ABSTRACT

Construction management plays a crucial role in translating the requirements and provisions of planning documents into actual spatial conditions on the ground. As a mountainous border province, Lao Cai faces distinctive characteristics and challenges in construction management. This study aims to evaluate the factors influencing construction management in Lao Cai Province. Data were collected from 67 officials and employees working in Lao Cai. The results indicate that all eight factors examined have a significant influence on construction management. These factors encompass both subjective and objective aspects and involve various stakeholders, including state management agencies, project investors, construction contractors, and local communities. These findings highlight the considerable complexity and challenges associated with construction management in Lao Cai.

Keywords: Influencing factors; construction management; urban; Lao Cai.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Luật Tổ chức chính quyền địa phương số 72/2025/QH15 xác lập hệ thống đơn vị hành chính hai cấp gồm cấp tỉnh và cấp xã, đồng thời yêu cầu phân định nhiệm vụ, quyền hạn theo hướng rõ chủ thể thực hiện và trách nhiệm về kết quả [1]. Trên địa bàn tỉnh Lào Cai, sau sắp xếp năm 2025, toàn tỉnh có 99 đơn vị hành chính cấp phường và xã, gồm 89 xã và 10 phường [2]. Quy mô này tạo ra một không gian quản lý rất không đồng đều: các phường trung tâm tập trung dân cư lớn và hoạt động xây dựng với cường độ cao, trong khi nhiều xã miền núi, vùng biên có diện tích lớn, dân cư phân tán không tập trung và điều kiện tiếp cận hiện trường khó khăn.

Trong giai đoạn 2025 - 2026 các căn cứ pháp lý của quản lý trật tự xây dựng cũng thay đổi mạnh. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15 có hiệu lực từ ngày 01/7/2025 và tiếp tục được sửa đổi bởi Luật số 144/2025/QH15 để phù hợp hơn với tổ chức chính quyền địa phương hai cấp [3, 4]. Nghị định số 178/2025/NĐ-CP và Nghị định số 34/2026/NĐ-CP quy định chi tiết và cập nhật cơ chế thực hiện quy hoạch đô thị, nông thôn [5, 6]. Từ ngày 01/7/2026, Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 có hiệu lực, cùng với Nghị định số 217/2026/NĐ-CP về quản lý hoạt động xây dựng và Nghị định số 207/2026/NĐ-CP về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình [7 - 9]. Ở cấp tỉnh, Quyết định số 11/2026/QĐ-UBND của UBND tỉnh Lào Cai về việc ban hành quy định một số nội dung về quản lý đầu tư và xây dựng trên địa bàn tỉnh Lào Cai là một căn cứ địa phương trong phân công trách nhiệm quản lý đầu tư và xây dựng [10].

Sự thay đổi đồng thời về tổ chức bộ máy, địa giới và pháp luật khiến công tác quản lý không chỉ thể hiện bằng số hồ sơ cấp phép. Công tác quản lý trật tự xây dựng bao gồm nhiều mắt xích liên tiếp như tiếp cận thông tin quy hoạch, kiểm tra điều kiện khởi công, theo dõi sự phù hợp của công trình với giấy phép hoặc yêu cầu pháp luật, kiểm tra hiện trường, xác minh phản ánh và xử lý hồ sơ vi phạm. Một công trình có thể không phát sinh thủ tục cấp phép

nhưng vẫn cần được theo dõi; ngược lại, một hồ sơ đã giải quyết về thủ tục không có nghĩa là đã kết thúc trách nhiệm quản lý tại hiện trường. Do đó, nhân lực thực thi phải được đặt trong quan hệ với toàn bộ chuỗi công việc thay vì chỉ với khối lượng thủ tục hành chính.

Bảng 1. So sánh một số địa bàn có đặc điểm mật độ dân cư khác nhau tại Lào Cai

Địa bàn	Diện tích (km^2)	Dân số (người)	Mật độ ước tính (người/km^2)
Phường Cam Đường	59,90	67.877	1.133,2
Phường Lào Cai	72,32	76.981	1.064,4
Xã A Mú Sung	104,40	5.955	57,0
Xã Mường Hum	212,80	6.814	32,0

Nguồn: Tổng hợp từ số liệu sắp xếp đơn vị hành chính của tỉnh Lào Cai [12]

Bảng 1 cho thấy độ chênh rất lớn về điều kiện không gian. Phường Cam Đường có mật độ khoảng 1.133 người/km^2 và phường Lào Cai khoảng 1.064 người/km^2, trong khi xã Mường Hum chỉ khoảng 32 người/km^2 và A Mú Sung khoảng 57 người/km^2 [12]. Chênh lệch này không thể đơn giản cho rằng nơi đông dân luôn cần nhiều nhân lực hơn nơi thưa dân. Ở khu vực mật độ cao, nhiệm vụ quản lý có thể tập trung vào việc theo dõi nhiều công trình thi công đồng thời, kiểm soát tác động đến các công trình liền kề, xử lý kịp thời những vấn đề phát sinh và giải quyết các hồ sơ hành chính liên quan. Ở địa bàn mật độ thấp, số vụ việc có thể ít hơn nhưng thời gian di chuyển, khả năng bao phủ, tần suất kiểm tra lại và chi phí tiếp cận hiện trường thường nhiều hơn. Mật độ vì vậy là một biến mô tả điều kiện quản lý, không phải thước đo duy nhất của nhu cầu nhân lực.

Thực tiễn sau sắp xếp cũng cho thấy khối lượng công việc có thể gia tăng bởi hồ sơ tồn và nhiệm vụ chuyển tiếp. Tại xã Tả Van, trong bài viết của Báo Lào Cai tháng 12/2025 ghi nhận địa phương tiếp nhận 188 trường hợp vi phạm có hồ sơ cần xử lý từ trước; từ ngày 01/7/2025 đến thời điểm bài viết, xã phát hiện thêm 93 trường hợp vi phạm mới thuộc các nhóm công trình nhà ở, kinh doanh và các hoạt động xây dựng, san gạt khác [13]. Đây là trường hợp cụ thể của một địa bàn, không đại diện cho toàn tỉnh, nhưng minh chứng rõ việc chính quyền cơ sở phải đồng thời xử lý tồn đọng cũ và phát sinh mới. Cùng với đó, tháng 6/2026, tỉnh Lào Cai yêu cầu rà soát toàn diện nguồn nhân lực cấp xã; kết quả bước đầu được công bố cho thấy nhiều xã, phường còn thiếu hoặc chưa đáp ứng yêu cầu chuyên môn ở các lĩnh vực, trong đó có đất đai và xây dựng [11]. Hai loại bằng chứng này đặt vấn đề nhân lực vào đúng bối cảnh thực thi thay vì chỉ xem như một vấn đề biên chế hành chính.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu về quản lý xây dựng và thực thi quy định đô thị thường tập trung vào ba nhóm vấn đề: chất lượng thể chế và cơ chế thực thi; năng lực của cơ quan quản lý; và điều kiện kinh tế - xã hội, không gian của nơi vi phạm phát sinh. OECD cho rằng hiệu quả kiểm tra và thực thi quy định phụ thuộc vào việc sử dụng bằng chứng, tập trung theo rủi ro, phối hợp giữa các cơ quan, quản trị minh bạch, tích hợp thông tin và tính chuyên nghiệp của lực lượng thực thi [14]. Koh khi nghiên cứu xây dựng trái phép tại Hà Nội nhấn mạnh vai trò của cán bộ quản lý địa phương như chủ thể trung gian giữa yêu cầu của Nhà nước và hành vi của người dân; khả năng và mức độ sẵn sàng thực hiện có ảnh hưởng trực tiếp rất lớn đến hiệu lực quản lý [16]. Viet Thanh Nguyen và cộng sự nghiên cứu về xây dựng tại Việt Nam cho thấy điều kiện địa lý thuận lợi cho lấn chiếm, thiếu nhân lực thực thi và hạn chế ứng dụng công nghệ thông tin là ba vấn đề được xếp hạng cao nhất trong quản lý xây dựng trái phép [15]. Các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị được tổng hợp tại Bảng 2.

Bảng 2. Các nhân tố khảo sát và cơ sở nhận diện

Mã	Nhân tố khảo sát	Nguồn tham khảo
NT1	Hệ thống văn bản quy phạm pháp luật về quản lý trật tự xây dựng đô thị và quy hoạch đô thị	[10]; [14]
NT2	Tốc độ đô thị hóa và áp lực dân số cơ học	[15]; [12]
NT3	Áp lực kinh tế và giá trị gia tăng của bất động sản	[15], [16]
NT4	Đặc điểm lịch sử và địa hình khu vực quản lý	[12], [13], [15]
NT5	Năng lực của đội ngũ cán bộ	[11], [14 - 16]
NT6	Đạo đức công vụ của đội ngũ cán bộ	[14, [16]
NT7	Ý thức pháp luật của chủ đầu tư và cộng đồng	[13], [14], [16]
NT8	Mức độ ứng dụng khoa học công nghệ	[14], [15]

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Phân tích thống kê

(1) Cơ cấu giới tính của người tham gia khảo sát

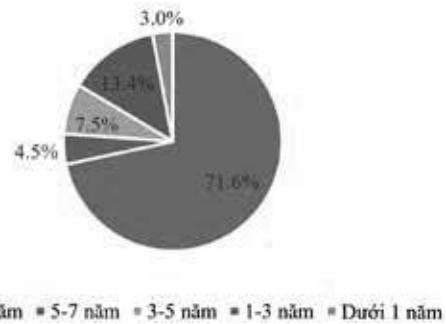
Khảo sát được thực hiện trong khoảng thời gian 9 - 10/2026. Số liệu được thu thập từ 67 cán bộ đang làm việc tại các cơ quan quản lý nhà nước có liên quan tới công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị. Trong đó nam giới chiếm 44,8% (30/67 người) và nữ giới chiếm 55,2% (37/67 người).

(2) Về trình độ chuyên môn

Các cán bộ có trình độ cử nhân/kỹ sư/kiến trúc sư chiếm 73,1%; các cán bộ có trình độ thạc sĩ, tiến sĩ chiếm 26,9%.

(3) Về kinh nghiệm công tác

Tổng hợp kinh nghiệm công tác của những người tham gia khảo sát, có 48/67 người tham gia khảo sát, tương ứng 71,6%, có trên 7 năm kinh nghiệm; 9 người (13,4%) có từ 1 - 3 năm; 5 người (7,5%) có từ 3 - 5 năm; 3 người (4,5%) có từ 5 - 7 năm và 2 người (3,0%) dưới 1 năm.



Hình 1. Kinh nghiệm công tác của người trả lời

3.2. Phân tích, đánh giá các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại tỉnh Lào Cai

Kết quả khảo sát cho thấy điểm trung bình của 08 nhân tố giao động từ 3,48 đến 3,87. Điều này phản ánh các nhân tố có mức ảnh hưởng cao đến công tác quản lý trật tự xây dựng đô thị tại tỉnh Lào Cao (Bảng 3).

Bảng 3. Kết quả đánh giá các nhân tố ảnh hưởng

Mã	Nhân tố	Điểm TB
NT1	Hệ thống văn bản QPPL về QLTTXD và quy hoạch đô thị	3,64
NT2	Tốc độ đô thị hóa và áp lực dân số cơ học	3,69
NT3	Áp lực kinh tế và giá trị gia tăng của bất động sản	3,87
NT4	Đặc điểm lịch sử và địa hình khu vực quản lý	3,48
NT5	Năng lực của đội ngũ cán bộ	3,82
NT6	Đạo đức công vụ của đội ngũ cán bộ	3,78
NT7	Ý thức pháp luật của chủ đầu tư và cộng đồng	3,72
NT8	Mức độ ứng dụng khoa học công nghệ	3,70

Nhân tố NT3 - áp lực kinh tế và giá trị gia tăng của bất động sản - có điểm trung bình cao nhất, đạt 3,87. Có 43/67 người trả lời chấm mức 4 hoặc 5, tương ứng 64,2%; trong đó 18 người chọn mức 5. Số liệu đó phản ánh nhận thức khá rõ rằng động cơ kinh tế gắn với giá trị đất, khả năng khai thác công trình và lợi ích từ phát triển bất động sản có thể tạo áp lực lên quá trình tuân thủ quy hoạch và trật tự xây dựng. Tuy nhiên, kết quả khảo sát cho thấy vẫn có sự khác biệt trong đánh giá của những người tham gia khảo sát. Sự khác biệt này liên quan đến mức độ phát triển bất động sản và áp lực quản lý xây dựng không đồng đều giữa các khu vực đô thị, du lịch, ven đô và miền núi.

NT5, năng lực của đội ngũ cán bộ - có điểm trung bình 3,82, xếp thứ hai trong tám nhân tố được khảo sát. Trong đó, 45/67 người đánh giá ở mức 4 - 5, chiếm 67,2%, bao gồm 32 người chọn mức 4 và 13 người chọn mức 5. Đây là nhân tố có tỷ lệ đánh giá mức 4 - 5 cao nhất và ý kiến của người tham gia khảo sát khá thống nhất về mức độ ảnh hưởng của năng lực cán bộ đối với công tác quản lý trật tự xây dựng. Đáng chú ý, kết quả rà soát nhân lực của tỉnh Lào Cai năm 2026 cũng ghi nhận nhiều xã, phường còn thiếu cán bộ hoặc chưa đáp ứng yêu cầu chuyên môn trong lĩnh vực đất đai, xây dựng [11]. Thực tế này cho thấy việc bố trí cán bộ có chuyên môn phù hợp, đáp ứng yêu cầu kiểm tra, giám sát và xử lý vi phạm xây dựng là vấn đề cần được quan tâm, nhất là trong giai đoạn chính quyền cấp xã, phường được giao thực hiện nhiều nhiệm vụ quản lý hơn.

NT6 - đạo đức công vụ - đạt 3,78 và xếp thứ ba; 59,7% người trả lời đánh giá mức 4 - 5. Năng lực chuyên môn và đạo đức công vụ có quan hệ mật thiết với nhau nhưng không đồng nhất. Năng lực phản ánh khả năng đọc được hồ sơ, hiểu quy hoạch, phát hiện sai khác hiện trường, xác định căn cứ và hoàn thiện thủ tục; đạo đức công vụ liên quan đến tính khách quan, nhất quán, trách nhiệm và liêm chính khi áp dụng quy định. OECD coi tính chuyên nghiệp, quản trị minh bạch và tính độc lập khỏi can thiệp không phù hợp là những cấu phần trọng yếu của hệ thống thanh tra, kiểm tra hiệu quả [14]. Việc hai nhân tố NT5 và NT6 cùng nằm trong nhóm ba điểm trung bình cao nhất cho thấy người tham gia khảo sát không chỉ quan tâm đến nguồn nhân lực mà còn chú ý đến chất lượng của công tác thực thi của đội ngũ.

NT7 - ý thức pháp luật của chủ đầu tư và cộng đồng - đạt 3,72/5, xếp thứ tư. Chiếm 36/67 người đánh giá mức 4 - 5. Trường hợp Tả Van cho thấy xử lý vi phạm tại cơ sở vừa liên quan đến biện pháp hành chính, vừa gắn với tuyên truyền và sự hợp tác của cộng đồng [13]. Các ý kiến từ khảo sát cho rằng không thể tách riêng phần ảnh hưởng do thiếu hiểu biết pháp luật, do động cơ kinh tế hay do khó tiếp cận thông tin quy hoạch; các cơ chế này có thể cùng tồn tại trong một vụ việc.

NT8 - mức độ ứng dụng khoa học công nghệ - có điểm trung bình 3,70/5; 58,2% người trả lời chấm mức 4 - 5. Công nghệ trong quản lý trật tự xây dựng có thể bao gồm số hóa quy hoạch, dữ liệu vị trí công trình, chia sẻ hồ sơ, hình ảnh hiện trường và theo dõi quá trình xử lý. OECD nhấn mạnh tích hợp thông tin và công nghệ là điều kiện để tập trung kiểm tra theo rủi ro và giảm trùng lặp nguồn lực [14]. Nghiên cứu của Nguyen và cộng sự tại Việt Nam cũng xếp hạn chế ứng dụng công nghệ thông tin vào nhóm rủi ro nổi bật [15]. So với kết quả đó, vị trí thứ năm của NT8 tại Lào Cai cho thấy công nghệ được nhìn nhận quan trọng nhưng chưa phải yếu tố đứng đầu trong mẫu này.

NT2 - tốc độ đô thị hóa và áp lực dân số cơ học - đạt 3,69/5 và có 58,2% đánh giá mức 4 - 5. Sự phát triển đô thị làm tăng số lượng giao dịch đất đai, nhà ở, cải tạo và xây dựng mới; đồng thời làm tăng việc sử dụng không gian đô thị lên. Tuy nhiên, tác động của đô thị hóa tại Lào Cai không đồng đều theo địa bàn. Phường Lào Cai và Cam Đường có mật độ trên 1.000 người/km^2, trong khi đấy nhiều xã vùng núi, biên giới lại ở mức vài chục người/km^2 [12]. Vì vậy, "áp lực dân số" nếu đo bình quân cấp xã có thể không thể hiện được các cụm dân cư, khu du lịch hoặc điểm phát triển có cường độ xây dựng cao nằm trong một địa bàn rộng.

NT1 - hệ thống văn bản quy phạm pháp luật - có điểm trung bình 3,64/5, xếp thứ bảy. Kết quả này không có nghĩa khung pháp lý ít quan trọng, mà cho thấy trong bối cảnh khảo sát, người trả lời đánh giá các áp lực kinh tế và năng lực thực thi trực tiếp nổi bật hơn. Giai đoạn 2025 - 2026 thực tế là thời kỳ pháp luật xây dựng và quy hoạch thay đổi nhanh, đồng thời phải tương thích với mô hình chính quyền địa phương hai cấp [1], [3 - 10]. Khi quy định thay đổi, cán bộ không chỉ phải áp dụng nội dung pháp luật mới mà còn phải xác định thời điểm phát sinh hồ sơ, làm rõ việc áp dụng các điều khoản chuyển tiếp và đối chiếu quy định của trung ương với quy định của địa phương.

NT4 - đặc điểm lịch sử và địa hình khu vực quản lý - có điểm trung bình thấp nhất, đạt 3,48/5, trong đó 47,8% người tham gia khảo sát đánh giá ở mức 4 - 5. Có sự khác biệt tương đối lớn trong đánh giá của người tham gia khảo sát. Kết quả này không hoàn toàn tương đồng với nghiên cứu của Nguyen và cộng sự [15], trong đó điều kiện địa lý thuận lợi cho việc lấn chiếm được xếp vào nhóm rủi ro cao nhất trong quản lý xây dựng trái phép tại Việt Nam. Sự khác biệt có thể xuất phát từ nội dung khảo sát và đặc điểm của đối tượng nghiên cứu. Trong thực tế, ảnh hưởng của địa hình đối với công tác quản lý trật tự xây dựng thường thể hiện rõ tại các xã miền núi, nơi địa bàn rộng, giao thông khó khăn, dân cư phân tán, làm tăng thời gian và nhân lực phục vụ kiểm tra hiện trường. Do đó, mặc dù có điểm đánh giá thấp nhất trong tám nhân tố, đặc điểm lịch sử và địa hình vẫn là yếu tố quan trọng cần xem xét trong công tác quản lý trật tự xây dựng tại Lào Cai.

Kết quả khảo sát đặt nhân lực ở vị trí trung tâm, nhưng ý nghĩa của NT5 lại thay đổi theo không gian quản lý. Ở hai phường có mật độ cao, một cán bộ có thể tiếp cận nhiều công trình trong khoảng cách ngắn hơn, song phải xử lý đồng thời nhiều hồ sơ, nhiều phản ánh và nhiều công việc thực thi giữa công trình với nhà ở, hạ tầng, chỉ giới và không gian công cộng. Độ trễ trong phát hiện có thể làm tăng chi phí khắc phục khi công trình đã thi công sang giai đoạn khó đảo ngược. Do đó, tại khu vực mật độ cao, áp lực thực thi thể hiện ở việc phải giải quyết đồng thời nhiều hồ sơ, vụ việc và yêu cầu kiểm tra, phản hồi trong thời gian ngắn trên phạm vi địa bàn tương đối hẹp.

Ở xã miền núi mật độ thấp, yêu cầu quản lý còn thể hiện ở việc bảo đảm kiểm tra, giám sát công trình trên địa bàn rộng với các điểm dân cư phân tán. Khoảng cách giữa trung tâm hành chính với các thôn, điểm dân cư hoặc khu vực xây dựng làm tăng thời gian đi hiện trường; một lượt kiểm tra có thể chiếm phần đáng kể quỹ thời gian trong ngày. Khi cần quay lại để xác minh hiện trạng, bổ sung ảnh, đo đạc hoặc làm việc với chủ thể liên quan, số giờ thực hiện trên một vụ việc có thể cao dù tổng số vụ thấp. Bảng 1 cho thấy Mường Hum có diện tích gần gấp ba phường Lào Cai nhưng dân số chỉ bằng khoảng 8,9% của phường Lào Cai. Nếu chỉ dùng tỷ lệ cán bộ trên số dân, đặc điểm chi phí không gian này sẽ không được phản ánh.

Do đó, nhu cầu nhân lực trong quản lý trật tự xây dựng không chỉ phụ thuộc vào mật độ dân cư mà còn chịu ảnh hưởng từ đặc điểm và khối lượng công việc tại từng địa bàn. Đối với các phường có mật độ dân cư cao, số lượng công trình xây dựng và hồ sơ cần giải quyết thường lớn hơn, đòi hỏi cán bộ phải thường xuyên kiểm tra, giám sát và kịp thời xử lý các vi phạm phát sinh. Trong khi đó,

tại các xã miền núi có dân cư phân tán, số lượng công trình có thể ít hơn nhưng địa bàn quản lý rộng, giao thông khó khăn, thời gian di chuyển đến hiện trường kéo dài, ảnh hưởng đến tần suất kiểm tra và khả năng phát hiện vi phạm. Vì vậy, khi đánh giá nhu cầu nhân lực cần xem xét đồng thời số lượng công trình, khối lượng hồ sơ, điều kiện địa bàn và năng lực chuyên môn của cán bộ, thay vì chỉ căn cứ vào quy mô dân số hoặc số lượng công chức hiện có.

Sau khi triển khai mô hình chính quyền địa phương hai cấp, chính quyền cấp xã được giao thực hiện nhiều nhiệm vụ quản lý hơn, trong đó có lĩnh vực quy hoạch và trật tự xây dựng. Kết quả rà soát của tỉnh Lào Cai cho thấy một số xã, phường còn thiếu cán bộ hoặc chưa đáp ứng yêu cầu chuyên môn trong lĩnh vực đất đai, xây dựng [11]. Thực trạng này có sự tương đồng với kết quả của khảo sát nhân tố NT5 về năng lực của đội ngũ cán bộ. Song, tình trạng thiếu nhân lực cần được xem xét cụ thể tại từng địa phương, bởi ngoài số lượng cán bộ, hiệu quả quản lý còn phụ thuộc vào chuyên môn và nhiệm vụ được phân công. Đặc biệt, đối với cán bộ kiêm nhiệm nhiều lĩnh vực, thời gian dành cho kiểm tra hiện trường, theo dõi công trình và xử lý vi phạm có thể bị hạn chế. Do đó, việc bố trí nhân lực cần căn cứ vào yêu cầu công việc thực tế và khả năng đáp ứng chuyên môn của đội ngũ cán bộ tại mỗi địa bàn.

Đối với các nhân tố liên quan đến đội ngũ cán bộ, năng lực chuyên môn (NT5) và đạo đức công vụ (NT6) có điểm trung bình lần lượt là 3,82 và 3,78, đứng thứ hai và thứ ba trong tám nhân tố được khảo sát. Kết quả này cho thấy người tham gia khảo sát đánh giá cao vai trò của trình độ chuyên môn và trách nhiệm của cán bộ trong công tác quản lý trật tự xây dựng. Trong thực tế, việc kiểm tra công trình, đối chiếu với quy hoạch, giấy phép xây dựng và xử lý các trường hợp vi phạm đòi hỏi cán bộ phải có kiến thức chuyên môn, kinh nghiệm thực tiễn và tinh thần trách nhiệm cao. Tuy nhiên, hiệu quả thực hiện nhiệm vụ còn phụ thuộc vào khối lượng công việc được giao, sự đầy đủ của hồ sơ quy hoạch và khả năng tiếp cận thông tin về các công trình xây dựng trên địa bàn. Vì vậy, bên cạnh việc nâng cao trình độ và trách nhiệm của đội ngũ cán bộ, cần quan tâm đến điều kiện làm việc và việc phân công nhiệm vụ phù hợp với yêu cầu quản lý tại từng địa phương.

4. BÀN LUẬN VÀ KẾT LUẬN

Nhìn chung, 08 nhân tố có điểm trung bình từ 3,48 đến 3,87. Biên độ dao động về điểm không lớn cho thấy người trả lời nhìn nhận quản lý trật tự xây dựng là vấn đề chịu tác động đồng thời của nhiều nhóm yếu tố, thay vì hội tụ toàn bộ khó khăn cho một nguyên nhân. Ba kết quả nổi bật tổng kết được từ nghiên cứu liên kết trực tiếp với đặc điểm của Lào Cai trong giai đoạn đầu vận hành mô hình hai cấp.

- Thứ nhất, áp lực kinh tế và giá trị bất động sản có điểm trung bình cao nhất, cho thấy yếu tố lợi ích kinh tế được nhìn nhận là động lực quan trọng phía đối tượng quản lý.

- Thứ hai, năng lực cán bộ có tỷ lệ đánh giá cao/rất cao lớn nhất và mức phân tán thấp nhất, cho thấy sự nhất quán tương đối cao trong nhận thức về vai trò của năng lực thực thi.

- Thứ ba, sự chênh lệch về mật độ dân cư và điều kiện địa hình khiến hạn chế về nhân lực biểu hiện khác nhau giữa các địa bàn: tại khu vực dân cư tập trung, cán bộ phải xử lý nhiều hồ sơ, vụ việc trong thời gian ngắn; tại địa bàn dân cư phân tán, khó khăn chủ yếu nằm ở thời gian di chuyển và khả năng bố trí nhân lực để kiểm tra, giám sát trên phạm vi rộng.

Kết quả khảo sát cho thấy năng lực của đội ngũ cán bộ là một trong những nhân tố được đánh giá có ảnh hưởng lớn đến công tác quản lý trật tự xây dựng tại Lào Cai. Nhận định này phù hợp với thông tin rà soát nhân lực của tỉnh năm 2026, trong đó một số xã, phường còn thiếu cán bộ hoặc chưa đáp ứng yêu cầu chuyên môn trong lĩnh vực đất đai, xây dựng [11]. Kết quả nghiên cứu cũng có điểm tương đồng với nghiên cứu của Nguyen và cộng sự [15] về những khó khăn liên quan đến nhân lực trong quản lý xây dựng trái phép tại Việt Nam. Tuy nhiên, để xác định cụ thể nhu cầu bổ sung nhân lực tại từng địa phương, cần tiếp tục đánh giá số lượng cán bộ, nhiệm vụ được phân công và khối lượng công việc thực tế.

Khảo sát được thực hiện với 67 cán bộ và người lao động, trong đó có 48 người có trên 7 năm kinh nghiệm công tác. Kết quả khảo sát phản ánh đánh giá của những người tham gia về các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý trật tự xây dựng tại Lào Cai. Tuy nhiên, số liệu hiện có chưa đủ để xác định nguyên nhân trực tiếp của những hạn chế trong quản lý cũng như nhu cầu nhân lực cụ thể tại từng xã, phường. Để đánh giá đầy đủ hơn, cần bổ sung số liệu về số lượng hồ sơ, công trình xây dựng, các trường hợp vi phạm, số lượt kiểm tra hiện trường và thời gian xử lý công việc. Trên cơ sở đó, có thể xem xét khối lượng công việc thực tế và khả năng đáp ứng của đội ngũ cán bộ tại từng địa phương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Tổ chức chính quyền địa phương số 72/2025/QH15 ngày 16/6/2025.

[2] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 1673/NQ-UBTVQH15 về sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Lào Cai năm 2025. 2025.

[3] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15 ngày 26/11/2024. 2024.

[4] Quốc hội. Luật số 144/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn. 2025.

[5] Chính phủ. Nghị định số 178/2025/NĐ-CP ngày 01/7/2025 quy định chi tiết một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn. 2025.

[6] Chính phủ. Nghị định số 34/2026/NĐ-CP ngày 22/01/2026 sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 178/2025/NĐ-CP. 2026.

[7] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10/12/2025, có hiệu lực từ 01/7/2026. 2025.

[8] Chính phủ. Nghị định số 217/2026/NĐ-CP ngày 19/6/2026 quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng về quản lý hoạt động xây dựng. 2026.

[9] Chính phủ. Nghị định số 207/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng. 2026

[10] UBND tỉnh Lào Cai. Quyết định số 11/2026/QĐ-UBND ngày 29/01/2026 ban hành Quy định một số nội dung về quản lý đầu tư và xây dựng trên địa bàn tỉnh Lào Cai. 2026.

[11] Báo điện tử Chính phủ. Rà soát, đánh giá cán bộ toàn diện; xây kế hoạch tuyển dụng công chức cấp xã, ngày 27/6/2026. Internet: https://xaydungchinhsach.chinhphu.vn/ra-soat-danh-gia-can-bo-toan-dien-xay-ke-hoach-tuyen-dung-cong-chuc-cap-xa-119260625144930651.htm (truy cập: tháng 9/2026).

[12] Cổng thông tin đối ngoại tỉnh Lào Cai. Thông tin phương án sắp xếp đơn vị hành chính cấp xã, số liệu diện tích và dân số các đơn vị mới, 2025. Internet: https://doingoailaocai.vn/vi/bai-viet/22271 (truy cập: tháng 9/2026).

[13] Nguyễn Tất Đạt & Nguyễn Đình Hiếu. Xã Tả Van: Quyết tâm lập lại trật tự xây dựng, đất đai, Báo Lào Cai, 08/12/2025. Internet: https://baolaocai.vn/xa-ta-van-quyet-tam-lap-lai-trat-tu-xay-dung-dat-dai-post888454.html (truy cập: tháng 9/2026)

[14] OECD. OECD Regulatory Enforcement and Inspections Toolkit, OECD Publishing, Paris. 2018. https://doi.org/10.1787/9789264303959-en

[15] Viet Thanh Nguyen ,Sy Tien Do ,Cuong N. N. Tran &Vu Hai Nguyen. "Understanding illegal construction management in Vietnam: risk priorities and underlying risk structures", International Journal of Construction Management, published online 03 August 2026. 2026. https://doi.org/10.1080/15623599.2026.2709080

[16] Koh, D. "Illegal Construction in Hanoi and Hanoi's Wards", European Journal of East Asian Studies, vol. 3, no. 2, pp. 337 -369. 2004, https://doi.org/10.1163/1570061042780928

■Ngày nhận bài: 15/10/2026 ■Ngày sửa bài: 24/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/10/2026

Cấu trúc và kiểm soát chất lượng dữ liệu mô hình BIM phục vụ đánh giá carbon A1-A3 trong thiết kế

Structuring and quality control of BIM model data for A1-A3 carbon assessment during design

> THS.NCS HUỲNH VĂN KHANH[1], CAO VĂN DUY[2,*], NGUYỄN THÁI CHÂU[3], PGS.TS LÊ TRUNG PHONG[4]
[1]Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn
[2]HVCH, Trường Đại học Lạc Hồng
[3]Công ty TNHH Xây dựng và Thương mại Nine Ten
[4]Trường Đại học Thủy lợi
[*]Email: caoduybmt@gmail.com

TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất cấu trúc dữ liệu Revit phục vụ đánh giá carbon hàm chứa A1-A3 trong thiết kế. Phương pháp liên kết các cấp dữ liệu gồm tệp dự án, bộ môn, Category, Family/Type, Instance và Material/Layer với các quy tắc xác định khối lượng, mã vật liệu, hệ số phát thải và lần tính toán. Mô hình lưu trữ thông tin định danh và trạng thái; thư viện bên ngoài quản lý hệ số phát thải kèm nguồn, đơn vị và phiên bản. Kiểm kê mô hình kết cấu Revit 2025 ghi nhận 765 cấu kiện, trong đó 729 cấu kiện thuộc phạm vi tính toán. Dữ liệu thí điểm gồm 1.185,737 m^3 bê tông, 158.637,1 kg thép quy đổi và 601.485,95 kg CO_2e; sàn và dầm/giằng chiếm 71,85% tổng lượng phát thải. Kết quả minh họa khả năng truy vết dữ liệu và sàng lọc các nhóm cấu kiện chi phối phát thải. Do tính phù hợp của hệ số phát thải với điều kiện dự án chưa được xác nhận đầy đủ và khối lượng chưa được kiểm chứng bằng phương pháp độc lập, kết quả tính toán chỉ được sử dụng để minh họa khả năng áp dụng của phương pháp. Cấu trúc dữ liệu đề xuất hỗ trợ cập nhật kết quả đánh giá khi thiết kế thay đổi và tạo cơ sở đối chiếu các phương án vật liệu trong cùng phạm vi tính toán.

Từ khóa: BIM; Revit; carbon hàm chứa; A1-A3; chất lượng dữ liệu; khối lượng.

ABSTRACT

This study proposes a Revit data structure for A1-A3 embodied carbon assessment during design. The method links project files, disciplines, Category, Family/Type, Instance and Material/Layer to quantity rules, material identifiers, emission factors and calculation runs. The model stores identities and statuses, while an external library maintains sourced, unit-compatible and versioned factors. A Revit 2025 structural case registered 765 elements, with 729 within the calculation scope. The pilot inventory comprised 1,185.737 m^3 of concrete and 158,637.1 kg of proxy reinforcement, yielding 601,485.95 kg CO_2e. Slabs and beams/bracing accounted for 71.85% of emissions. The results illustrate traceability and hotspot screening. Since the applicability of emission factors to project conditions has not been fully confirmed and quantities have not been independently verified, the calculated results are used only to illustrate the applicability of the method. The proposed data structure supports reassessment after design changes and provides a basis for comparing material alternatives within the same calculation scope.

Keywords: BIM; Revit; embodied carbon; A1-A3; data quality; quantity takeoff.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thiết kế, đánh giá carbon hàm chứa cần dữ liệu đủ sớm để phản hồi phương án và đủ rõ để kiểm tra giả định. Khung LCA yêu cầu công bố mục tiêu, ranh giới, kiểm kê và giới hạn diễn giải; A1-A3 bao gồm cung ứng nguyên liệu, vận chuyển đến cơ sở sản xuất và sản xuất vật liệu [1 - 4].

BIM liên kết hình học, vật liệu và khối lượng, nhưng đánh giá BIM-LCA còn gặp khó khăn về mức phát triển thông tin, khả năng tương tác và ánh xạ vật liệu [5, 6]. Các cách tiếp cận theo cấu kiện hoặc cụm cấu kiện giúp tự động hóa đánh giá sớm, với điều kiện mô hình và quy tắc đo được kiểm soát [7 - 9].

Mô hình thể hiện đúng bản vẽ vẫn có thể sai Category, thiếu vật liệu, chứa phần tử trùng hoặc cộng đồng thời cấu kiện chủ và thành phần con. Ghi hệ số trực tiếp vào nhiều Instance còn làm tăng nguy cơ dùng dữ liệu cũ. Vấn đề nghiên cứu là tổ chức chuỗi dữ liệu để

xác định cấu kiện nào được tính, theo đại lượng nào và thuộc lần đánh giá nào.

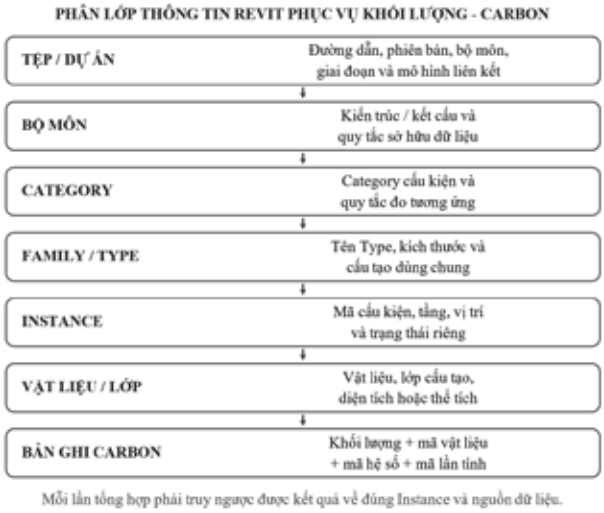
Bài báo đề xuất cấu trúc phân lớp Revit, bảng kiểm dựng hình, kiến trúc liên kết mô hình–thư viện hệ số và chỉ tiêu đánh giá mức sẵn sàng dữ liệu. Nghiên cứu tình huống kết cấu được dùng để minh họa khả năng truy vết, tổng hợp khối lượng và xác định nhóm cấu kiện chi phối phát thải trong thiết kế.

2. CƠ SỞ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc phân lớp trong Revit và khả năng lấy thông tin

Dữ liệu Revit được tổ chức theo tệp dự án, bộ môn, Category, Family/Type, Instance và Material/Layer (Hình 1, Bảng 1). Chuỗi này mô tả cách lọc và liên kết thông tin; không phải quan hệ kế thừa cứng cho mọi phần tử, vì Family hệ thống và Family thành phần có cơ chế khác nhau.

Category quyết định quy tắc đo: kết cấu bê tông ưu tiên thể tích; vật liệu dạng tấm có thể dùng diện tích; cửa dùng rộng × cao khi hệ số tương ứng với toàn sản phẩm theo m^2. Cấu kiện vách kính chủ phải được phân biệt với panel và mullion. Các hàm GetMaterialIds, GetMaterialVolume và GetMaterialArea phụ thuộc khả năng hỗ trợ của Category; nối hình học và lỗ mở cũng ảnh hưởng đại lượng [10]. Giá trị nội bộ phải được đổi đơn vị bằng UnitUtils trước tổng hợp [11].



Hình 1. Cấu trúc phân lớp thông tin Revit phục vụ khối lượng - carbon

Nguồn: Tác giả đề xuất theo cấu trúc Revit và hợp đồng dữ liệu [10, 11]

Bảng 1. Vai trò của các cấp thông tin trong chuỗi khối lượng - carbon

Cấp thông tin	Dữ liệu	Vai trò	Kiểm soát
Tệp/dự án	Đường dẫn, bộ môn, phiên bản	Khóa nguồn	Cùng mốc thiết kế
Category	Tường, sàn, dầm, cột…	Chọn quy tắc Q	Đúng chức năng
Family/Type	Kích thước, cấu tạo	Nhóm tương thích	Không suy vật liệu từ tên
Instance	ID, tầng, trạng thái	Truy vết	Giữ giá trị riêng
Material/Layer	Vật liệu, diện tích/thể tích	Xác định Q	Không cộng host/child
Bản ghi carbon	Q/đơn vị, Material_ID, Factor_ID, Run_ID	Tổng hợp	Giữ liên kết về nguồn

Nguồn: Tác giả tổng hợp theo mô hình nghiên cứu và Revit API [10, 11]

2.2. Yêu cầu dựng hình để truy xuất thông tin

Điều kiện khai thác khối lượng bắt đầu từ quy ước dựng hình: phạm vi vật lý chỉ biểu diễn một lần, Category đúng chức năng, vật liệu có ý nghĩa và tham số nguồn được công bố (Bảng 2). Nguyên tắc tổ chức thông tin của TCVN 14177-1:2024 và TCVN 14177-2:2024 được vận dụng để duy trì chủ sở hữu, trạng thái và phiên bản dữ liệu [12, 13].

Bảng 2. Các yêu cầu mô hình hóa ảnh hưởng đến khối lượng và phát thải carbon

Yêu cầu	Quy định	Rủi ro
Category/Type	Dùng đúng Category và cấu tạo Type	Sai quy tắc đo
Phạm vi	Một nguồn cho một phạm vi vật lý	Trùng host/child hoặc host/link
Hình học	Kiểm tra Join/Cut, lỗ mở, chồng lấn	Sai diện tích/thể tích
Ngữ cảnh	Khóa phase, option, workset, bộ môn	Trộn phương án
Vật liệu/lớp	Gán theo cấu tạo, không theo màu	Sai ánh xạ
Tham số	Đúng Type/Instance, nguồn, đơn vị	Sai kích thước/Q
Dữ liệu thiếu	Ghi HOLD và lý do; không thay bằng 0	Che giấu thiếu dữ liệu
Kết quả	Lưu Run_ID và lịch sử	Mất dấu phiên bản đầu vào

Nguồn: Tác giả đề xuất từ bảng kiểm S0 và quy tắc khối lượng

Bảng 3. Ý nghĩa và nguồn dữ liệu của các tham số BIMC gắn trong mô hình

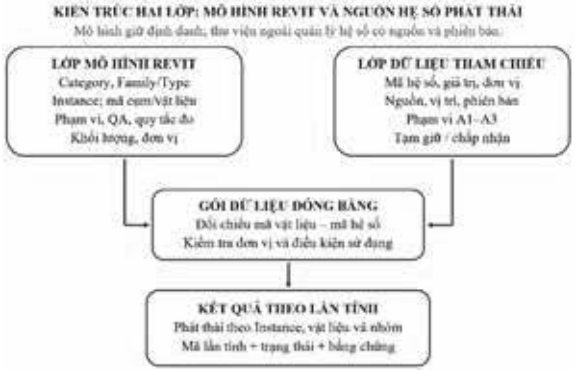
Trường trên Instance	Ý nghĩa	Thông tin DATA / kiểm soát
BIMC_Assembly_ID BIMC_Material_ID	Mã cụm hoặc vật liệu	Mã cụm; Project_Material_ID. Một mã lõi.
BIMC_Scope_Status BIMC_Owner_Rule	Phạm vi; ARC/STR	Discipline; Category_Keys; quyết định phạm vi.
BIMC_Status_Note BIMC_QA_Status	Lý do và QA mô hình	Notes; Blocking_Reason; bằng chứng QA dự án.
BIMC_Quantity_Rule_ID BIMC_Data_Origin	Quy tắc Q; nguồn	Quantity_Rule_ID; Data_Origin.
BIMC_REF_Mapping_ID BIMC_REF_Factor_IDs	Ánh xạ tham chiếu	Mapping_Template_ID; Factor_ID.
BIMC_REF_EF_A1A3_EQUIV BIMC_REF_EF_Unit BIMC_REF_Quantity_Basis	Hệ số tương đương và cơ sở Q	Giá trị/đơn vị EF; Quantity_Basis; Host_Unit. Cache.
BIMC_REF_Factor_Status BIMC_REF_DB_Version BIMC_REF_Sync_Hash	Trạng thái, phiên bản, đồng bộ	QA_Status; Version; Ready_For_Calculation; hash đồng bộ.
BIMC_REF_Concrete_Grade BIMC_REF_Steel_Grade	Nhãn cấp tham chiếu	Nhãn catalog; chưa xác nhận fck/fy.

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ hợp đồng BIMC và Material Mapping Database V1

2.3. Gắn thông tin carbon vào mô hình Revit

Tham số dùng chung cấp Instance giữ định danh, phạm vi, QA và quy tắc khối lượng. Bảng 3 giải thích các trường BIMC_* và thông tin lấy từ bảng dữ liệu DATA. Với mục INCLUDED, thông thường chỉ một mã cụm hoặc vật liệu lõi được dùng; mục HOLD/EXCLUDED phải ghi lý do. Data_Origin nhận MODEL, PROXY, BOM hoặc MANUAL. Trạng thái phê duyệt ánh xạ mô hình được quản lý độc lập với trạng thái hệ số.

Các trường BIMC_REF_* hiển thị mã ánh xạ, hệ số tương đương, đơn vị, phiên bản và dấu đồng bộ. Đây là bản sao tham chiếu; phép tính chính thức phải đọc lại nguồn hệ số đã kiểm soát, không lấy BIMC_REF_EF_A1A3_EQUIV làm hệ số đầu vào. Hình 2 thể hiện liên kết giữa mô hình, thư viện, gói đóng băng và kết quả theo lần tính.



Hình 2. Kiến trúc hai lớp giữa mô hình Revit và thư viện hệ số phát thải

Nguồn: Tác giả đề xuất từ hợp đồng dữ liệu nghiên cứu

2.4. Nguồn hệ số phát thải và nguyên tắc lựa chọn

Ưu tiên EPD hoặc nguồn phù hợp với sản phẩm, địa lý, công nghệ và thời điểm dự án. Nguồn tổng quát phải có Factor_ID, đơn vị, vị trí nguồn, phiên bản và trạng thái. Trường hợp minh họa sử dụng ICE Database Educational V5.0 theo điều kiện nguồn, không phân phối dữ liệu thô [14]. Các hệ số vật liệu đã nghiên cứu tại Việt Nam cho thấy khả năng bổ sung dữ liệu đặc thù trong nước [15].

Hai hệ số tham chiếu là 277,152574 kg CO_2e/m^3 cho bê tông cấp 25/30 theo tên ICE và 1,72 kg CO_2e/kg cho thép. Tính tương đương của hai hệ số với vật liệu và nguồn cung của dự án chưa được xác nhận đầy đủ. Thép được quy đổi theo suất 100 - 180 kg/m^3 tùy nhóm, đã được kỹ sư thiết kế dự án xác nhận cho thiết kế cơ sở và khái toán; đây là giả định thiết kế, không thay bảng thống kê cốt thép thi công.

Đối với kiến trúc, phải kiểm tra quy cách và đơn vị: kính có thể theo m^2; nhôm hoặc sơn theo kg cần bảng kê hay định mức chuyển đổi có bằng chứng. Dòng thiếu cơ sở quy đổi được tạm giữ, không thay đại lượng bằng 0.

2.5. Quy trình tính toán và chỉ tiêu đánh giá



Hình 3. Quy trình khai thác mô hình BIM phục vụ đánh giá carbon A1-A3

Nguồn: Tác giả đề xuất từ quy trình nghiên cứu

Quy trình tại Hình 3 kiểm kê, xác định phạm vi, lấy khối lượng, ánh xạ, chọn hệ số, tính và phản hồi. Với dòng vật liệu i, Q_i và EF_i phải tương thích đơn vị; hệ số đã theo m^3 hoặc m^2 không nhân thêm khối lượng riêng. Phát thải dòng và tổng được tính theo (1), (2):

$$EC_i = Q_i \times EF_i \quad (1)$$

$$EC = \Sigma_i EC_i \quad (2)$$

Mức sẵn sàng dữ liệu được đánh giá qua tỷ lệ cấu kiện có Q hợp lệ, tỷ lệ có Material_ID/Factor_ID, lỗi phạm vi và khả năng truy vết. Độ chính xác khối lượng cần được kiểm chứng bằng phương pháp độc lập trên cùng phạm vi, quy tắc đo và đơn vị. Khi đánh giá tác động của thay đổi thiết kế hoặc vật liệu, cần đối chiếu các phương án trước và sau điều chỉnh, đồng thời công bố các thay đổi về khối lượng và hệ số phát thải.

3. NGHIÊN CỨU TÌNH HUỐNG VÀ KẾT QUẢ

3.1. Mô hình và phạm vi đánh giá

Mô hình kết cấu Revit 2025 của dự án thực tế được kiểm kê tại S0: 765 cấu kiện chủ, gồm 729 thuộc phạm vi tính và 36 đối tượng cầu thang/chiếu nghỉ ngoài phạm vi bộ tính. Mốc S0 ghi nhận tiếp nhận mô hình và xử lý lỗi dựng hình trong phạm vi kiểm tra; chưa có giá trị carbon để so với S1.

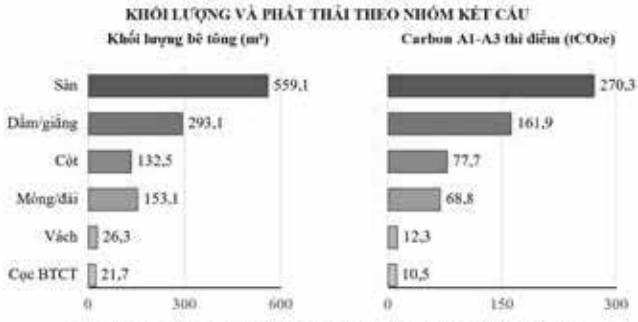
Mốc S1 gồm sàn, dầm/giằng, cột, móng/đài, vách và cọc bê tông cốt thép. Thể tích lấy theo Category; thép quy đổi theo suất của nhóm. Bộ dữ liệu đầu vào ghi nhận phạm vi cấu kiện, khối lượng, quy tắc đo và phiên bản hệ số phát thải tại thời điểm đánh giá, làm cơ sở truy vết kết quả.

3.2. Khối lượng và phát thải theo nhóm cấu kiện

Bảng 4. Kết quả khối lượng và carbon A1-A3 thí điểm theo nhóm kết cấu

Nhóm	Số CK	Bê tông (m^3)	Thép (kg)	Carbon (kgCO_2e)	Tỷ trọng
Sàn kết cấu	45	559,054	67.086,5	270.332,2	44,94%
Dầm/giằng	374	293,076	46.892,2	161.881,3	26,91%
Cột kết cấu	173	132,508	23.851,4	77.749,3	12,93%
Móng/đài	25	153,075	15.307,5	68.753,9	11,43%
Vách kết cấu	22	26,337	2.897,1	12.282,3	2,04%
Cọc BTCT	90	21,687	2.602,5	10.487,0	1,74%
Tổng	729	1.185,737	158.637,1	601.485,95	100,00%

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ gói dữ liệu và báo cáo kết cấu; kết quả thí điểm



Hình 4. Khối lượng bê tông và phát thải A1–A3 thí điểm theo nhóm kết cấu

Nguồn: Tác giả thống kê từ nghiên cứu tình huống; tính phù hợp của hệ số với dự án chưa được xác nhận đầy đủ

Bảng 4 và Hình 4 cho tổng 1.185,737 m^3 bê tông, 158.637,1 kg thép quy đổi và 601.485,95 kg CO_2e. Sàn chiếm 44,94%, dầm/giằng

26,91%; hai nhóm đạt 71,85%. Thêm cột, ba nhóm chiếm 84,78%. Đây là cơ sở ưu tiên rà soát chiều dày sàn, nhịp, tiết diện và suất thép; chưa chứng minh một phương án tối ưu vì kết quả còn phụ thuộc giả định và nguồn hệ số.

3.3. Phản hồi thiết kế và khả năng tối ưu vật liệu-khối lượng

Việc đánh giá tác động của thay đổi thiết kế hoặc vật liệu cần đối chiếu phương án ban đầu với phương án sau điều chỉnh thực tế. So sánh chỉ có ý nghĩa khi phạm vi cấu kiện, quy tắc đo, đơn vị và mức độ bao phủ dữ liệu tương thích. Cần phân biệt phần biến động carbon do thay đổi khối lượng, hệ số phát thải hoặc phạm vi tính toán; không quy mọi chênh lệch cho hiệu quả cải thiện thiết kế.

Nhóm thiết kế có thể khảo sát chiều dày sàn, sơ đồ nhịp, tiết diện hoặc nguồn vật liệu; mỗi kịch bản phải giữ mã phiên bản và bảng khối lượng tương ứng. Nguồn thép, cấp phối và hàm lượng tái chế chỉ được đưa vào so sánh khi có hệ số phù hợp. Cách tổ chức theo cụm và quy tắc tái sử dụng hỗ trợ đánh giá sớm [16].

Carbon là chỉ tiêu hỗ trợ lựa chọn; phương án còn phải đáp ứng khả năng chịu lực, công năng, kiến trúc, chi phí và điều kiện cung ứng. Cấu trúc dữ liệu đề xuất tạo cơ sở đánh giá biến động carbon khi thiết kế hoặc vật liệu thay đổi; hiệu quả giảm phát thải cần được kiểm chứng thông qua các phương án trước và sau điều chỉnh. Nghiên cứu hiện tại chưa thực hiện tối ưu tự động.

4. THẢO LUẬN

Chuỗi truy vết kết nối Category/Type, nguồn khối lượng, vật liệu, hệ số và Run_ID. Điểm đóng góp là công bố điều kiện sử dụng dữ liệu trước tổng hợp, giúp nhận biết phần được tính và phần còn thiếu. Số tổng carbon riêng lẻ không phản ánh đầy đủ mức sẵn sàng của mô hình.

Kiến trúc hai lớp giảm nguy cơ hệ số lỗi thời còn lưu trong Instance: mô hình giữ định danh/trạng thái; thư viện quản lý nguồn và phiên bản; gói DATA ghi nhận đầu vào theo thời điểm. Mã đồng bộ hỗ trợ phát hiện cache cũ nhưng không thay phê duyệt chuyên môn.

Mở rộng sang kiến trúc đòi hỏi quy tắc riêng cho lớp vật liệu, panel, mullion và đơn vị chuyển đổi. Cần báo cáo đồng thời phạm vi đã tính, tạm giữ và loại trừ; tổng carbon chỉ có ý nghĩa đối với phạm vi công bố (Bảng 5).

Bảng 5. Phạm vi kết luận và điều kiện nâng cấp kết quả

Nội dung	Bằng chứng hiện có	Chưa xác nhận	Điều kiện bổ sung
Cấu trúc	Lọc và truy vết theo cấp	Mọi mô hình đều đủ dữ liệu	Kiểm từng dự án
Khối lượng	729 cấu kiện trong phạm vi	Độ chính xác độc lập	Đối chiếu cùng quy tắc/đơn vị
Carbon	Phân bố thí điểm	Carbon chính thức toàn công trình	Hệ số phù hợp/được duyệt
Thiết kế	Sàng lọc nhóm chi phối	Phương án tối ưu	So sánh trước-sau cùng phạm vi

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ trạng thái bằng chứng nghiên cứu

Giới hạn nghiên cứu gồm một dự án, phạm vi định lượng kết cấu và thép quy đổi. Tính phù hợp của hệ số tham chiếu với vật liệu và nguồn cung tại Việt Nam chưa được xác nhận đầy đủ; khối lượng chưa được kiểm chứng bằng phương pháp độc lập. Chưa có diện tích sàn được xác nhận nên không báo cáo ECI. Kết quả chỉ có giá trị minh họa phương pháp trong phạm vi nghiên cứu, không phải kết quả đánh giá carbon chính thức cho toàn công trình.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đề xuất cấu trúc dữ liệu BIM kết nối phân lớp Revit, bảng kiểm dựng hình, tham số định danh, thư viện hệ số ngoài và kết quả theo lần tính. Trường hợp kết cấu minh họa khả năng truy vết khối lượng và phát thải của 729 cấu kiện trong phạm vi đánh giá.

Sàn và dầm/giằng chi phối 71,85% phát thải thí điểm, gợi ý thứ tự rà soát vật liệu-khối lượng trong thiết kế. Kết luận này giới hạn ở phạm vi và giả định công bố; mức giảm carbon chỉ được xác nhận sau so sánh các phương án tương thích.

Kiến nghị áp dụng bảng kiểm từ đầu dự án, quản lý hệ số có phiên bản và ưu tiên đối chứng nhóm phát thải lớn. Hướng nghiên cứu tiếp theo là kiểm chứng khối lượng bằng phương pháp độc lập, bổ sung nguồn hệ số phù hợp với điều kiện dự án và so sánh các phương án trước-sau điều chỉnh thiết kế hoặc vật liệu trên cùng phạm vi tính toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Royal Institution of Chartered Surveyors. Whole life carbon assessment for the built environment, 2nd ed., Version 3. London, UK: RICS, 2024.

[2] International Organization for Standardization. ISO 14040:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

[3] International Organization for Standardization. ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

[4] European Committee for Standardization. EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels, Belgium: CEN, 2019.

[5] B. Huang, H. Zhang, H. Ullah and Y. Lv. BIM-based embodied carbon evaluation during building early-design stage: A systematic literature review. Environmental Impact Assessment Review, vol. 112, art. no. 107768, 2025, doi: 10.1016/j.eiar.2024.107768.

[6] S. Parece, R. Resende, and V. Rato. BIM-based life cycle assessment: A systematic review on automation and decision-making during design. Building and Environment, vol. 282, art. no. 113248, 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2025.113248.

[7] J. Basbagill, F. Flager, M. Lepech and M. Fischer. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. Building and Environment, vol. 60, pp. 81-92, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.009.

[8] T. P. Obrecht, M. Röck, E. Hoxha, and A. Passer. BIM and LCA integration: A systematic literature review. Sustainability, vol. 12, no. 14, art. no. 5534, 2020, doi: 10.3390/su12145534.

[9] Y. Cang, Z. Luo, L. Yang and B. Han. A new method for calculating the embodied carbon emissions from buildings in schematic design: Taking building element as basic unit. Building and Environment, vol. 185, art. no. 107306, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107306.

[10] Autodesk. Material quantities. Revit API Developer's Guide, 2024. Internet. Available: https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/ (accessed: 7/2026].

[11] Autodesk. Units. Revit API Developer's Guide, 2025. Internet: https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU/ (accessed: 7/2026).

[12] TCVN 14177-1:2024. Tổ chức và số hóa thông tin về công trình xây dựng, bao gồm mô hình thông tin công trình (BIM) - Phần 1: Khái niệm và nguyên tắc, Hà Nội, 2024.

[13] TCVN 14177-2:2024. Tổ chức và số hóa thông tin về công trình xây dựng, bao gồm mô hình thông tin công trình (BIM) - Phần 2: Giai đoạn chuyển giao tài sản, Hà Nội, 2024.

[14] Circular Ecology. Inventory of Carbon and Energy (ICE) Database Educational V5.0, 2026. Internet: https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html. (accessed: 7/2026).

[15] Mai Cao Thi Tu, Do Tien Trung and Nguyen Thi Tam. Development of emission factor for building materials industry in Vietnam. Journal of Building Materials and Construction, vol. 11, no. 2, pp. 109-112, 2021.

[16] Y. Zou, Z. Ren, L. Wang, Q. Lei, X. Li, T. Liang and W. Chen. A BIM-based workflow for early-stage embodied carbon assessment using reusable assembly templates and rule-based mapping. Buildings, vol. 16, no. 4, art. no. 710, 2026, doi: 10.3390/buildings16040710.

■ Ngày nộp bài: 01/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 09/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 29/10/2026

Số hóa quy trình khai thác cảng container trong xu thế tự động hóa và cảng thông minh: Tổng quan nghiên cứu và khoảng trống nghiên cứu

Digitalization of container port operational processes amid automation and smart port development: A review of current research and research gaps

> PHẠM VĂN VƯỢNG[1,*], PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG[2], PGS.TS LÊ SƠN TÙNG[2]
[1]Viện Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[*]Email: vuong.qlvt2603d@ps.vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Sự phát triển của công nghệ số, tự động hóa và cảng thông minh đang làm thay đổi phương thức khai thác cảng container, đặt ra yêu cầu đánh giá mức độ số hóa thực tế của các quy trình vận hành. Nghiên cứu này tổng quan có cấu trúc các công trình liên quan nhằm hệ thống hóa sự phát triển của nghiên cứu số hóa cảng và xác định khoảng trống hiện nay. Kết quả cho thấy nghiên cứu đang phân tán giữa hai cấp độ: Từng công đoạn khai thác và toàn bộ cảng, trong khi cấp độ số hóa toàn bộ quy trình khai thác chưa được làm rõ và đo lường thống nhất. Nghiên cứu xác định cổng cảng, bãi container, cầu bến và chứng từ - thông tin là các nhóm quy trình trọng tâm, đồng thời làm rõ vai trò của liên thông dữ liệu và các nhóm yếu tố ảnh hưởng. Kết quả cung cấp cơ sở lý luận cho phát triển thang đo và mô hình nghiên cứu mức độ số hóa quy trình khai thác cảng container.

Từ khóa: Số hóa cảng; số hóa quy trình khai thác; cảng container; tự động hóa cảng; cảng thông minh; liên thông dữ liệu.

ABSTRACT

The rapid development of digital technologies, automation and smart ports is transforming container port operations and increasing the need to assess the actual level of digitalization across operational processes. This study conducts a structured literature review to synthesize the development of port digitalization research and identify current research gaps. The findings show that existing studies are largely divided between two levels of analysis: Individual operational stages and the port as a whole, while the digitalization of the integrated port operational process remains insufficiently conceptualized and lacks a unified measurement approach. The study identifies gate operations, container yard operations, berth operations and documentation and information processes as the core operational domains. It also highlights the importance of data interoperability and key groups of influencing factors. The findings provide a theoretical foundation for developing measurement scales and research models of container port operational process digitalization.

Keywords: Port digitalization; operational process digitalization; container ports; port automation; smart ports; data interoperability.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Số hóa, tự động hóa và cảng thông minh đang làm thay đổi mạnh mẽ cách thức tổ chức và vận hành cảng container. Năng lực khai thác hiện không chỉ phụ thuộc vào cầu bến, diện tích bãi, thiết bị xếp dỡ hay lao động mà ngày càng gắn với khả năng tạo lập, trao đổi, tích hợp và sử dụng dữ liệu trong toàn bộ quá trình khai thác. Hệ thống thông tin, dữ liệu số và khả năng kết nối vì vậy trở thành những thành phần quan trọng trong điều phối tàu, container, phương tiện và thiết bị, góp phần chuyển hoạt động cảng từ xử lý thủ công sang vận hành dựa trên dữ liệu và tự động hóa [1, 2].

Trong xu hướng đó, cảng tự động hóa và cảng thông minh trở thành những định hướng phát triển nổi bật. Tự động hóa tập trung vào việc giảm sự can thiệp trực tiếp của con người trong các hoạt động như xếp dỡ, vận chuyển nội bộ, quản lý bãi và nhận dạng tại cổng. Cảng

thông minh mở rộng hơn khi hướng tới sự tích hợp giữa công nghệ, dữ liệu, hệ thống thông tin, tổ chức và khả năng phối hợp trong toàn bộ hoạt động cảng. Các nghiên cứu về cảng thông minh, mức độ sẵn sàng số và mức độ trưởng thành số đã góp phần hình thành cách tiếp cận tổng thể đối với sự phát triển số của cảng [3, 4].

Tuy nhiên, các mô hình này chủ yếu đánh giá ở cấp toàn cảng, với nhiều phương diện như công nghệ, chiến lược, tổ chức, con người, an toàn và kết nối hệ sinh thái. Vì vậy, mức độ tự động hóa hoặc mức độ thông minh của cảng chưa trực tiếp phản ánh mức độ số hóa của các quy trình khai thác container. Một thiết bị hoặc công đoạn được tự động hóa cũng chưa bảo đảm dữ liệu được liên thông giữa các khâu và toàn bộ quy trình được vận hành liên tục trên nền tảng số.

Ở cấp tác nghiệp, một dòng nghiên cứu khác tập trung vào từng công đoạn cụ thể. Các nghiên cứu về cổng cảng chủ yếu xem xét đặt lịch và điều phối phương tiện, nghiên cứu về bãi tập trung vào lập kế hoạch, bố trí container và thiết bị tự động, còn nghiên cứu về cầu bến chú trọng phân bổ cầu, lập lịch tàu và thiết bị xếp dỡ. Đối với chứng từ và giao dịch, trọng tâm là hệ thống cộng đồng cảng, chứng từ điện tử, công nghệ chuỗi khối và cơ chế một cửa [5, 6]. Những nghiên cứu này cung cấp bằng chứng cụ thể về ứng dụng công nghệ số trong từng công đoạn, nhưng phần lớn vẫn xem xét các hoạt động riêng lẻ.

Khoảng trống nghiên cứu vì vậy không nằm ở sự thiếu vắng nghiên cứu về số hóa cảng, mà ở sự phân mảnh giữa cấp từng công đoạn và cấp toàn cảng. Bài báo này hệ thống hóa sự phát triển của nghiên cứu từ công nghệ thông tin, tự động hóa và cảng thông minh đến số hóa ở cấp quy trình, đồng thời tổng hợp bằng chứng tại bốn nhóm quy trình cốt lõi gồm cổng cảng, bãi container, cầu bến và chứng từ - thông tin. Qua đó, nghiên cứu làm rõ khoảng trống về khái niệm và đo lường, đồng thời định vị mức độ số hóa quy trình khai thác cảng container như một cấp phân tích riêng cho các nghiên cứu tiếp theo.

2. PHƯƠNG PHÁP TỔNG QUAN

Bài báo sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu có cấu trúc theo chủ đề nhằm hệ thống hóa sự phát triển của nghiên cứu về số hóa cảng và xác định khoảng trống ở cấp quy trình khai thác. Trọng tâm của tổng quan là phân loại, đối chiếu và tổng hợp các dòng nghiên cứu từ hệ thống thông tin, tự động hóa, cảng thông minh, mức độ sẵn sàng và trưởng thành số đến số hóa các quy trình khai thác container.

Nguồn tài liệu gồm các bài báo khoa học quốc tế và trong nước, sách chuyên khảo, luận án và các công trình liên quan trực tiếp đến số hóa cảng biển. Quá trình phân tích được thực hiện theo 4 bước. Thứ nhất, tài liệu được phân loại theo cấp độ phân tích, từ công nghệ riêng lẻ, từng công đoạn khai thác đến toàn bộ quy trình và toàn bộ hệ thống cảng. Thứ hai, các khái niệm số hóa, tự động hóa, chuyển đổi số, sẵn sàng số, trưởng thành số và cảng thông minh được phân biệt để xác định ranh giới nghiên cứu. Thứ ba, bằng chứng được tổng hợp theo 4 nhóm quy trình cốt lõi gồm cổng cảng, bãi container, cầu bến và chứng từ - thông tin. Thứ tư, các yếu tố ảnh hưởng được hệ thống hóa nhằm xác định hướng giải thích cho mức độ số hóa ở cấp quy trình.

3. SỰ PHÁT TRIỂN CỦA NGHIÊN CỨU SỐ HÓA CẢNG

3.1. Từ hệ thống thông tin đến chuyển đổi số cảng

Nghiên cứu về số hóa cảng trước hết phát triển từ việc ứng dụng các hệ thống thông tin phục vụ quản lý và khai thác. Các hệ thống thông tin trong cảng đã được nghiên cứu và hệ thống hóa, cho thấy chúng được sử dụng ở nhiều cấp độ, từ cấp cảng đến cộng đồng cảng và chuỗi logistics [1]. Vai trò của các hệ thống này không chỉ nằm ở lưu trữ và xử lý dữ liệu mà còn hỗ trợ trao đổi thông tin, phối hợp hoạt động và ra quyết định trong khai thác. Đây là nền tảng quan trọng cho sự chuyển dịch từ ứng dụng công nghệ thông tin riêng lẻ sang số hóa hoạt động cảng.

Trên cơ sở đó, các nghiên cứu tiếp tục mở rộng cách tiếp cận sang chuyển đổi số cảng biển, trong đó công nghệ được xem xét trong mối quan hệ với quy trình, tổ chức và sự phối hợp giữa các bên liên quan [7]. Vai trò của dữ liệu mở, khả năng tích hợp và kết nối thông tin cũng được nhấn mạnh trong các nghiên cứu tiếp theo [8]. Như vậy, nghiên cứu đã chuyển từ việc xem công nghệ như công cụ hỗ trợ sang nhìn nhận số hóa như một quá trình gắn kết công nghệ, dữ liệu và hoạt động vận hành. Tuy nhiên, các nghiên cứu ở giai đoạn này chủ yếu tập trung vào hệ thống thông tin và chuyển đổi số ở cấp độ cảng. Mức độ công nghệ và dữ liệu số thật sự được tích hợp vào các bước cụ thể của quy trình khai thác container chưa được xem xét như một đối tượng đo lường độc lập. Khoảng trống vì vậy nằm giữa hệ thống hỗ trợ số hóa và mức độ số hóa thực tế của quy trình khai thác.



Hình 1. Chuyển đổi số cảng

Nguồn: vneconomy.vn.

3.2. Từ tự động hóa đến cảng thông minh

Sự phát triển tiếp theo của nghiên cứu số hóa cảng gắn chặt với tự động hóa và mô hình cảng thông minh. Tự động hóa làm thay đổi cách thực hiện một số hoạt động khai thác thông qua việc sử dụng thiết bị, hệ thống điều khiển và công nghệ nhằm giảm mức độ can thiệp trực tiếp của con người. Trên nền tảng đó, nghiên cứu về cảng thông minh mở rộng phạm vi từ tự động hóa từng hoạt động sang tích hợp công nghệ, dữ liệu, hệ thống và năng lực tổ chức ở cấp toàn cảng.

Các nghiên cứu đã xây dựng khung và chỉ số cảng thông minh với cách tiếp cận đa chiều [3]. Kiến trúc cảng thông minh trong bối cảnh Công nghiệp 4.0 cũng được phát triển, nhấn mạnh tự động hóa, kết nối và tích hợp hoạt động [2]. Các nghiên cứu tiếp theo tiếp tục chỉ ra những định hướng quan trọng của đổi mới cảng container, trong đó tự động hóa, bền vững và hợp tác giữ vị trí quan trọng [9]. Các nghiên cứu này cho thấy cảng thông minh không chỉ là tập hợp các công nghệ riêng lẻ mà là một hệ thống có sự kết nối giữa công nghệ, dữ liệu và hoạt động.

Phạm vi rộng của khái niệm cảng thông minh cũng làm giảm khả năng phản ánh trực tiếp mức độ số hóa của quy trình khai thác. Các khung đánh giá thường bao gồm nhiều nội dung như công nghệ, quản trị, con người, an toàn, môi trường, bền vững và kết nối hệ sinh thái. Trong khi đó, quy trình khai thác container chỉ là một bộ phận của toàn bộ hệ thống cảng. Vì vậy, tự động hóa, cảng thông

minh và mức độ số hóa quy trình khai thác có quan hệ chặt chẽ nhưng không đồng nhất.



Hình 2: Cụm cảng Cái Mép

Nguồn: VIMC.

3.3. Từ mức độ sẵn sàng đến mức độ trưởng thành số

Khi nghiên cứu số hóa cảng chuyển từ nhận diện công nghệ sang đánh giá trình độ phát triển số, các khái niệm về mức độ sẵn sàng và mức độ trưởng thành bắt đầu được quan tâm. Chỉ số mức độ sẵn sàng số được phát triển nhằm đánh giá các điều kiện và năng lực cần thiết cho quá trình phát triển cảng thông minh [10]. Cách tiếp cận này mở rộng việc đánh giá từ sự hiện diện của công nghệ sang khả năng chuẩn bị và triển khai số hóa của cảng.

Ở cấp độ phát triển cao hơn, mô hình trưởng thành chuyển đổi số cảng được xây dựng với các phương diện liên quan đến chiến lược và quản lý, tổ chức và con người, công nghệ và an toàn, hoạt động và quy trình, cùng khả năng tích hợp với hệ sinh thái [4]. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá trình độ phát triển tổng thể của cảng trong quá trình chuyển đổi số. Tuy nhiên, mức độ sẵn sàng số, mức độ trưởng thành số và mức độ số hóa quy trình khai thác cần được phân biệt rõ. Mức độ sẵn sàng phản ánh các điều kiện và năng lực để triển khai số hóa. Mức độ trưởng thành phản ánh trình độ phát triển số tổng thể của cảng. Trong khi đó, mức độ số hóa quy trình khai thác phản ánh mức độ công nghệ và dữ liệu số thật sự được tích hợp và sử dụng trong quá trình thực hiện, kết nối và điều hành các hoạt động khai thác.

Như vậy, các nghiên cứu về sẵn sàng và trưởng thành số đã tạo cơ sở quan trọng cho việc đánh giá số hóa theo mức độ, nhưng đơn vị phân tích vẫn chủ yếu là toàn cảng hoặc tổ chức cảng. Các mô hình này chưa phản ánh trực tiếp sự khác biệt về mức độ số hóa giữa các quy trình cổng cảng, bãi container, cầu bến và chứng từ - thông tin. Đây là khoảng trống cần tiếp tục làm rõ khi nghiên cứu số hóa ở cấp quy trình khai thác.

4. KẾT QUẢ TỔNG HỢP VÀ THẢO LUẬN

4.1. Số hóa các công đoạn trong quy trình khai thác container

Kết quả tổng quan cho thấy công nghệ và dữ liệu số đã được ứng dụng tại hầu hết các công đoạn chính của khai thác cảng container, nhưng mức độ số hóa và cách tiếp cận còn khác nhau giữa cổng cảng, bãi container, cầu bến và chứng từ - thông tin. Phần lớn nghiên cứu tập trung vào một bài toán vận hành hoặc một hệ thống cụ thể, trong khi việc đánh giá mức độ số hóa của toàn bộ quy trình khai thác vẫn còn hạn chế.

Tại cổng cảng, công nghệ số chủ yếu được sử dụng để lập lịch, điều phối phương tiện và giảm ùn tắc. Các nghiên cứu về hệ thống đặt lịch xe và quản lý thời điểm phương tiện đến cho thấy dữ liệu có thể hỗ trợ tổ chức dòng xe và giảm thời gian chờ tại cổng [5]. Tuy nhiên, trọng tâm của các nghiên cứu này vẫn là hiệu quả điều phối phương tiện, chưa trực tiếp đánh giá mức độ số hóa của toàn bộ quy trình cổng.

Đối với bãi container, nghiên cứu tập trung vào lập kế hoạch, bố trí container, điều phối thiết bị và hỗ trợ ra quyết định. Các mô hình tối ưu hóa và thiết bị tự động cho thấy vai trò ngày càng lớn của dữ liệu và công nghệ trong quản lý bãi [11]. Dù vậy, tối ưu hóa hoặc tự động hóa một hoạt động chưa phản ánh đầy đủ mức độ số hóa của toàn bộ quy trình bãi, đặc biệt là khả năng cập nhật, chia sẻ và sử dụng dữ liệu liên tục giữa các hoạt động.

Tại cầu bến, các nghiên cứu chủ yếu xem xét phân bổ cầu, lập lịch tàu và thiết bị xếp dỡ. Việc sử dụng dữ liệu và mô hình tính toán đã hỗ trợ đáng kể cho quá trình lập kế hoạch và ra quyết định khai thác. Do vậy, hiệu quả của mô hình tối ưu không đồng nghĩa với việc toàn bộ quá trình từ thu nhận dữ liệu, lập kế hoạch, cập nhật đến điều chỉnh và truyền quyết định đã được số hóa.

Đối với chứng từ, giao dịch và thông tin, biểu hiện của số hóa rõ hơn thông qua hệ thống cộng đồng cảng, chứng từ điện tử, công nghệ chuỗi khối và cơ chế một cửa. Các nghiên cứu cho thấy xu hướng chuyển từ chứng từ giấy sang trao đổi dữ liệu và giao dịch điện tử ngày càng rõ nét [6], nhưng dòng thông tin số vẫn thường được nghiên cứu tách biệt với dòng vận động vật lý của container tại cầu bến, bãi và cổng.

4.2. Khoảng trống giữa số hóa từng công đoạn và số hóa toàn cảng

Các nghiên cứu hiện có đã bao phủ tương đối rộng hệ thống thông tin, tự động hóa, hệ thống cộng đồng cảng, cảng thông minh, dữ liệu mở và nhiều ứng dụng số khác. Do đó, khoảng trống không nằm ở sự thiếu vắng nghiên cứu về số hóa cảng, mà nằm ở cách các kết quả nghiên cứu được kết nối trong cùng một cấp độ phân tích.

Ở cấp tác nghiệp, nghiên cứu thường tập trung vào từng công nghệ hoặc công đoạn như đặt lịch xe, lập kế hoạch bãi, phân bổ cầu bến và số hóa chứng từ. Cách tiếp cận này có chiều sâu nhưng chỉ phản ánh từng phần của quy trình. Ở cấp tổng thể, các nghiên cứu về cảng thông minh, mức độ sẵn sàng và trưởng thành số đánh giá cảng trên nhiều phương diện công nghệ, tổ chức, con người và hệ sinh thái [3, 10, 2, 9, 4]. Những mô hình này có tính bao quát cao nhưng chưa trực tiếp phản ánh mức độ số hóa của từng quy trình khai thác.

Khoảng giữa hai cấp độ này là số hóa quy trình khai thác. Đây là cấp độ đủ cụ thể để phản ánh cách hoạt động khai thác được thực hiện, đồng thời đủ rộng để xem xét sự kết nối giữa các công đoạn. Theo hướng tiếp cận này, mức độ số hóa quy trình khai thác cảng container có thể được hiểu là mức độ dữ liệu và công nghệ số được tích hợp và sử dụng trong quá trình thực hiện, kết nối, giám sát, phối hợp và hỗ trợ quyết định đối với các hoạt động khai thác container. Đây là khái niệm tổng hợp được đề xuất từ kết quả tổng quan và cần tiếp tục được kiểm định trong nghiên cứu thực nghiệm.

4.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến mức độ số hóa

Tài liệu hiện có cho thấy quá trình số hóa cảng chịu tác động của nhiều nhóm điều kiện. Các nghiên cứu đặt công nghệ trong mối quan hệ với tổ chức và các bên liên quan [7], nhấn mạnh dữ liệu và khả năng tích hợp [8], đề cập đến vai trò quản trị trong triển khai hệ thống cộng đồng cảng [12], tập trung vào quản trị dữ liệu trong ứng dụng IoT [13] và xem xét an ninh mạng [14]. Bên cạnh đó, các yếu tố liên quan đến việc chấp nhận đổi mới tại cảng cũng được tổng hợp trong các nghiên cứu gần đây [15].

Từ các nghiên cứu này có thể nhận diện những nhóm điều kiện liên quan đến công nghệ và hạ tầng số, dữ liệu và quản trị dữ liệu, tổ chức và quản trị quy trình, nguồn nhân lực và năng lực số, phối hợp với các bên liên quan, môi trường thể chế, an toàn và độ tin cậy của hệ thống. Tuy nhiên, các yếu tố này xuất phát từ những nghiên

cứu có đối tượng và cấp độ phân tích khác nhau, nên không thể chuyển trực tiếp thành một mô hình nghiên cứu thống nhất.

4.4. Hàm ý đối với nghiên cứu tại Việt Nam

Các nghiên cứu tại Việt Nam đã bước đầu đề cập đến số hóa, cảng thông minh, các yếu tố ảnh hưởng và rào cản của chuyển đổi số. Tuy nhiên, phần lớn vẫn tiếp cận ở cấp cảng, doanh nghiệp hoặc hoạt động logistics tổng thể. Bằng chứng trực tiếp về cấu trúc và cách đo lường mức độ số hóa của toàn bộ quy trình khai thác container còn hạn chế.

Vấn đề vì vậy không phải là Việt Nam chưa có nghiên cứu về số hóa cảng, mà là chưa có đủ bằng chứng để phản ánh một cách thống nhất mức độ số hóa giữa các quy trình cốt lõi và sự kết nối giữa chúng. Trong thực tế, quá trình hiện đại hóa có thể diễn ra không đồng đều khi một số hoạt động đã được tự động hóa hoặc số hóa ở mức cao, trong khi các bước khác vẫn phụ thuộc vào nhập liệu, chứng từ hoặc phối hợp thủ công.

Tiếp cận ở cấp quy trình vì thế có thể bổ sung cho các nghiên cứu về cảng thông minh và trưởng thành số. Trọng tâm không chỉ là cảng đã đầu tư công nghệ gì hoặc đang ở cấp độ phát triển số nào, mà là công nghệ và dữ liệu đã được tích hợp vào hoạt động khai thác đến đâu, mức độ số hóa giữa các quy trình có khác nhau hay không và những điều kiện nào giải thích sự khác biệt đó. Đây là cơ sở để phát triển cấu trúc đo lường và mô hình nghiên cứu phù hợp với bối cảnh khai thác cảng container tại Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Tổng quan nghiên cứu cho thấy nghiên cứu số hóa cảng đã phát triển từ hệ thống thông tin và tự động hóa đến cảng thông minh, mức độ sẵn sàng và trưởng thành số. Tuy nhiên, bằng chứng hiện vẫn phân tán giữa nghiên cứu từng công đoạn và nghiên cứu toàn cảng. Khoảng trống nổi bật nằm ở việc chưa hình thành đầy đủ một cấu trúc thống nhất phản ánh mức độ số hóa của toàn bộ quy trình khai thác container. Nghiên cứu tiếp theo cần tập trung phát triển thang đo ở cấp quy trình, làm rõ vai trò của liên thông dữ liệu và kiểm định các yếu tố ảnh hưởng đến mức độ số hóa trong bối cảnh khai thác cảng container.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] L. Heilig and S. Voß. Information systems in seaports: A categorization and overview. Information Technology and Management, vol. 18, no. 3, pp. 179-201, 2017, doi: 10.1007/s10799-016-0269-1.

[2] H. Min. Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0. Maritime Economics & Logistics, vol. 24, no. 2, pp. 189-207, 2022, doi: 10.1057/s41278-022-00211-3.

[3] A. Molavi, G. J. Lim and B. Race. A framework for building a smart port and smart port index. International Journal of Sustainable Transportation, vol. 14, no. 9, pp. 686-700, 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1610919.

[4] D. R. Utama, M. Hamsal, S. B. Abdinagoro, and R. K. Rahim. Developing a digital transformation maturity model for port assessment in archipelago countries: The Indonesian case. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. 26, Art. no. 101146, 2024, doi: 10.1016/j.trip.2024.101146.

[5] G. Chen, K. Govindan and Z. Yang. Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. International Journal of Production Economics, vol. 141, no. 1, pp. 179-188, 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.03.033.

[6] A. Moros-Daza, R. Amaya-Mier and C. Paternina-Arboleda. Port Community Systems: A structured literature review. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 133, pp. 27-46, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2019.12.021.

[7] L. Heilig, E. Lalla-Ruiz and S. Voß. Digital transformation in maritime ports: Analysis and a game theoretic framework. Netnomics: Economic Research and Electronic Networking, vol. 18, nos. 2-3, pp. 227-254, 2017, doi: 10.1007/s11066-017-9122-x.

[8] T. Inkinen, R. Helminen and J. Saarikoski. Port digitalization with open data: Challenges, opportunities and integrations. Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity, vol. 5, no. 2, Art. no. 30, 2019, doi: 10.3390/joitmc5020030.

[9] M. Heikkilä, J. Saarni and A. Saurama. Innovation in smart ports: Future directions of digitalization in container ports. Journal of Marine Science and Engineering, vol. 10, no. 12, Art. no. 1925, 2022, doi: 10.3390/jmse10121925.

[10] R. Philipp. Digital readiness index assessment towards smart port development. NachhaltigkeitsManagementForum, vol. 28, pp. 49-60, 2020, doi: 10.1007/s00550-020-00501-5.

[11] X. Feng, Y. He, and K.-H. Kim. Space planning considering congestion in container terminal yards. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 158, pp. 5-77, 2022, doi: 10.1016/j.trb.2022.02.012.

[12] E. Tijan, M. Jović, A. Panjako and D. Žgaljić. The role of port authority in port governance and port community system implementation. Sustainability, vol. 13, no. 5, Art. no. 2795, 2021, doi: 10.3390/su13052795.

[13] J. Gao, Y. Sun, R. Rameezdeen and C. Chow. Understanding data governance requirements in IoT adoption for smart ports: A gap analysis. Maritime Policy & Management, vol. 51, no. 4, pp. 617-630, 2024, doi: 10.1080/03088839.2022.2155318.

[14] C. Senarak. Port cybersecurity and threat: A structural model for prevention and policy development. The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol. 37, no. 1, pp. 20-36, 2021, doi: 10.1016/j.ajsl.2020.05.001.

[15] K. Sooprayen, G. Van de Kaa and J. F. J. Pruyn. Factors for innovation adoption by ports: A systematic literature review. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, vol. 10, pp. 953-962, 2024, doi: 10.1007/s40722-024-00339-9.

■ Ngày nhận bài: 15/7/2026 ■ Ngày sửa bài: 01/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2026

Nghiên cứu ứng dụng Hệ thống Quản lý không gian Cấp xã (LSMS) trong chuyển đổi số và nâng cao hiệu quả quản trị đô thị địa phương

Application of Local Spatial Management System (LSMS) for digital transformation and local urban governance improvement

> THS.NCS TRẦN MỸ HẢO, TS NGUYỄN VĂN KHÁNH*
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP Hồ Chí Minh
*Email: nvkhanh@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Quản lý không gian đô thị cấp xã/phường tại Việt Nam đang đối mặt với nhiều thách thức do sự phân mảnh dữ liệu chuyên ngành và thiếu hụt các công cụ số hóa trực quan. Bài báo giới thiệu Hệ thống Quản lý Không gian Cấp xã (LSMS - Local Spatial Management System), giải pháp Hạ tầng Dữ liệu Không gian Địa lý số (SDI) chuyên ngành tích hợp công nghệ WebGIS (MapLibre GL JS), Mobile GIS Offline-First (React Native + WatermelonDB), Cơ sở dữ liệu PostGIS và Trí tuệ nhân tạo (AI OCR, Chatbot AI RAG). Hệ thống gồm hệ sinh thái 8 phân hệ chuyên ngành (Đất đai, Xây dựng, Hạ tầng, Môi trường, An sinh, Thiên tai, Kinh tế - Xã hội và Viễn thám UAV), đáp ứng toàn diện các bài toán thực tiễn tại địa phương như phường Diên Hồng, TP.HCM. Kết quả triển khai cho thấy LSMS giúp minh bạch hóa 100% dữ liệu địa bàn, tối ưu hóa trên 50% thời gian xử lý nghiệp vụ, nâng cao chỉ số phục vụ người dân và hỗ trợ hiệu quả công tác chỉ đạo điều hành của chính quyền cơ sở.

Từ khóa: Quản lý không gian cấp xã; LSMS; WebGIS; chuyển đổi số; phường Diên Hồng.

ABSTRACT

Urban spatial management at the ward/commune level in Vietnam faces significant challenges due to domain data fragmentation and a lack of visual digital tools. This paper presents the Local Spatial Management System (LSMS), a specialized Spatial Data Infrastructure (SDI) platform integrating WebGIS (MapLibre GL JS), Offline-First Mobile GIS (React Native + WatermelonDB), PostGIS database and Artificial Intelligence (AI OCR, Chatbot AI RAG). Featuring an ecosystem of 8 specialized sub-systems (Land, Construction, Infrastructure, Environment, Social Welfare, Disaster Management, Socio-Economics and UAV Remote Sensing), LSMS addresses practical local governance requirements demonstrated in Dien Hong Ward, Ho Chi Minh City. Implementation results indicate that LSMS transparently digitizes 100% of spatial data, reduces operational processing time by over 50%, enhances public service satisfaction and effectively empowers local administration leadership.

Keywords: Local spatial management; LSMS; WebGIS; digital transformation; Dien Hong Ward.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thực hiện Chương trình Chuyển đổi số Quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030 theo Quyết định số 749/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ, việc đẩy mạnh ứng dụng công nghệ thông tin và xây dựng chính quyền số tại cấp cơ sở (xã/phường) đóng vai trò then chốt [1]. Cấp xã/phường là đơn vị hành chính tiếp xúc trực tiếp với người dân, chịu trách nhiệm quản lý toàn diện các lĩnh vực địa bàn gồm đất đai, xây dựng, hạ tầng kỹ thuật, môi trường, an sinh xã hội và an ninh trật tự theo Luật Tổ chức Chính quyền Địa phương.

Tuy nhiên, thực trạng quản lý nhà nước tại nhiều chính quyền xã/phường hiện nay còn tồn tại bốn "nghịch lý" quản trị: (1) Sự phân mảnh dữ liệu (Data Silos) do mỗi bộ phận chuyên môn sử dụng sổ sách giấy hoặc file quản lý riêng lẻ, không chia sẻ không gian; (2) sự thiếu vắng chiều thông tin địa lý không gian trong công tác tham mưu, dẫn đến một số quyết định hành chính còn mang tính chủ quan; (3) áp lực quá tải công việc kiểm tra, khảo sát thực địa của cán bộ chuyên trách khi khối lượng hồ sơ lớn nhưng công cụ khảo sát thủ công và (4) thách thức bảo đảm an toàn thông tin, bảo vệ dữ liệu cá nhân theo Nghị định số 13/2023/NĐ-CP [2].

Để giải quyết triệt để các hạn chế trên, nghiên cứu này giới thiệu giải pháp Hệ thống Quản lý Không gian Cấp xã (LSMS - Local Spatial Management System) đóng vai trò như một Hạ

tầng Dữ liệu Không gian địa lý (SDI) chuyên ngành cấp cơ sở [5]. Bài báo giới thiệu kiến trúc tổng thể, các nguyên tắc thiết kế cốt lõi và hiệu quả ứng dụng thực tế của hệ thống LSMS tại phường Diên Hồng, TP.HCM trong đợt cao điểm hưởng ứng Ngày Chuyển đổi số Quốc gia năm 2026.

2. KHÁI QUÁT HỆ THỐNG LSMS VÀ NGUYÊN TẮC THIẾT KẾ

2.1. Nguyên tắc thiết kế hệ thống đáp ứng yêu cầu quản lý địa phương

Hệ thống LSMS được phát triển dựa trên 4 nguyên tắc thiết kế cốt lõi, hướng tới chuẩn hóa quy trình nghiệp vụ hành chính công và nâng cao hiệu quả tương tác người dùng:

- Bản đồ là trung tâm (Map-Centric Interface): Mọi đối tượng quản lý nhà nước (từ thửa đất, công trình xây dựng, điểm ô nhiễm rác thải, hộ nghèo, trụ nước chữa cháy đến doanh nghiệp…) đều được định danh tọa độ địa lý. Lãnh đạo và cán bộ chuyên trách nắm bắt tức thời toàn bộ hiện trạng địa bàn qua giao diện bản đồ số.

- Thiết kế giao diện tối ưu theo vai trò nghiệp vụ (Role-Tailored UX): Hệ thống cung cấp giao diện Bảng điều khiển (Leader Dashboard) tổng hợp chỉ số KPI cho Lãnh đạo UBND phường; giao diện WebGIS tác nghiệp chuyên sâu cho chuyên viên và Cổng thông tin mở (Public Portal) cho người dân tra cứu.

- Ứng dụng khảo sát, thu thập dữ liệu thực địa ưu tiên ngoại tuyến (Offline-First PWA): Đảm bảo hoạt động liên tục và ổn định tại các khu vực bị khuất tín hiệu mạng 4G/Wifi. Dữ liệu khảo sát thực địa được tự động gán tọa độ không gian, mốc thời gian ghi nhận và đồng bộ hóa hai chiều về máy chủ trung tâm ngay khi có kết nối mạng.

- Đảm bảo tính pháp lý và giao diện thuần Việt: Ngôn ngữ giao diện, cấu trúc dữ liệu và quy trình xử lý được thiết kế tuân thủ chặt chẽ Luật Đất đai 2024, Quy chuẩn Kỹ thuật Quốc gia QCVN 01:2021/BXD và Nghị định số 13/2023/NĐ-CP về bảo vệ dữ liệu cá nhân.

2.2. Hệ sinh thái 8 phân hệ chuyên ngành liên thông

Hệ thống LSMS được thiết kế theo mô hình kiến trúc WebGIS đa tầng [4], cấu trúc thành 8 phân hệ chuyên ngành tích hợp thống nhất trên nền CSDL không gian PostgreSQL 15/PostGIS 3.3:

1. Phân hệ Đất đai & Địa chính (dat_dai): Quản lý bản đồ thửa đất, quy hoạch phân khu (1/2000), ranh giới địa giới hành chính khu phố mới.

2. Phân hệ Xây dựng & Đô thị (xay_dung): Quản lý hồ sơ Giấy phép xây dựng (GPXD), giám sát thi công 4 giai đoạn, xử lý vi phạm trật tự xây dựng.

3. Phân hệ Hạ tầng Kỹ thuật (ha_tang): Quản lý tuyến đường/hẻm, cơ sở tài sản công, hệ thống chiếu sáng công cộng và tự động nhận diện vùng tối (Dark Zones).

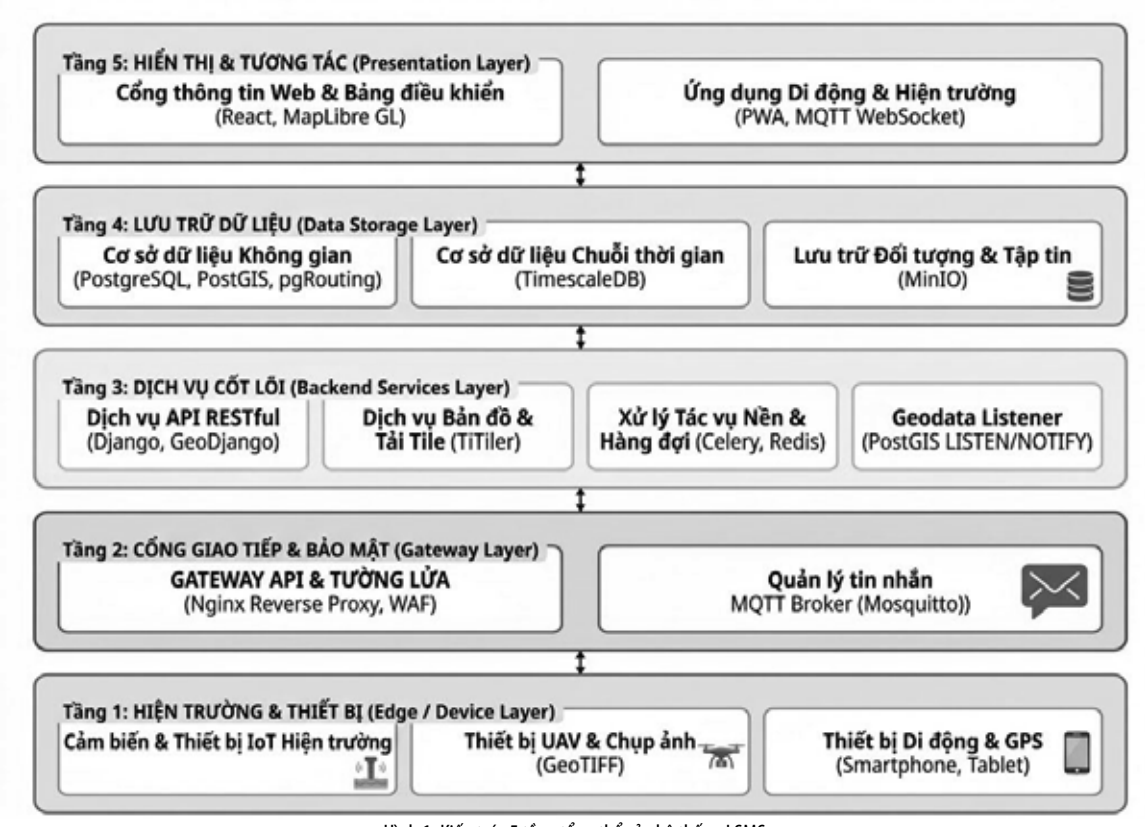
4. Phân hệ Môi trường (moi_truong): Định vị nhóm nguồn thải, điểm đen ô nhiễm rác thải, mạng lưới thoát nước và liên thông thu phí rác.

5. Phân hệ An sinh & Dân cư (an_sinh): Bản đồ hóa nhóm hộ chính sách, bảo trợ xã hội, quản lý nhà trọ và tích hợp camera an ninh khu phố.

6. Phân hệ Thiên tai & PCCC (thien_tai): Cảnh báo điểm ngập, bản đồ phương án sơ tán dân, vị trí trụ nước PCCC và nhận diện hẻm nhỏ < 3,0 m.

7. Phân hệ Kinh tế - Xã hội (kinh_te_xa_hoi): Quản lý bản đồ mật độ các hộ kinh doanh và doanh nghiệp, phân loại ngành nghề và quản lý nghĩa vụ thuế.

8. Phân hệ Viễn thám UAV (UAV): Quản lý ảnh bay chụp trực giao độ phân giải cao COG, tích hợp công cụ thanh trượt đối chiếu đa thời kỳ (Swipe Compare).



Hình 1. Kiến trúc 5 tầng tổng thể của hệ thống LSMS

3. GIỚI THIỆU DEMO ỨNG DỤNG HỆ THỐNG LSMS GIẢI QUYẾT CÁC BÀI TOÁN THỰC TIỄN TẠI PHƯỜNG DIÊN HỒNG – TP.HCM

Trên cơ sở khảo sát tình hình thực tế tại phường Diên Hồng, TP.HCM (quản lý 69 cơ sở đất công, 106 tuyến hẻm, 3.535 hộ kinh doanh và 17 dự án đầu tư công 137,9 tỷ đồng), DEMO Hệ thống LSMS đã chứng minh khả năng giải quyết vượt trội các bài toán nghiệp vụ trọng tâm [3]:

3.1. Chỉ đạo bồi thường GPMB và quản lý đất công dôi dư

Đối với dự án mở rộng hẻm 334 Lý Thường Kiệt (vốn 1.172,0 triệu đồng, vướng bàn giao mặt bằng nhà 7B/105/16 Thành Thái và số 334 Lý Thường Kiệt), phân hệ Địa giới & GPMB hỗ trợ lãnh đạo UBND phường mở bản đồ số chồng sếp ranh thu hồi đất lên nền PostGIS. Hệ thống tự động bóc tách diện tích giải tỏa, trích xuất bảng tọa độ VN-2000 và kích hoạt công cụ Swipe Compare đối soát ảnh UAV trước và sau tháo dỡ.

Đối với danh mục 69 cơ sở nhà đất công, bảng thông tin chỉ đạo điều hành tô màu phân loại hiện trạng sử dụng và tự động phát cảnh báo trước 30 ngày đối với các hợp đồng cho thuê đất công sắp hết hạn.

3.2. Khảo sát ngoại nghiệp 106 tuyến hẻm và tự động hóa thủ tục sổ đỏ

Khảo sát thực địa 106 tuyến hẻm hư hỏng (hẻm 256, 268, 402 Nguyễn Tiểu La…) tại các khu vực hẻm sâu bị mất sóng 4G, Mobile App LSMS lưu trữ dữ liệu khảo sát và ảnh chụp định vị GPS vào bộ nhớ SQLite nội bộ, sau đó tự động đồng bộ về máy chủ khi có kết nối. Tính năng AR Stakeout (thực tế ảo tăng cường) hiển thị mũi tên 3D trên màn hình di động dẫn đường cán bộ tìm chính xác vị trí cắm mốc ranh giới sửa chữa.

Đối với công tác cấp GCN và trích đo địa chính (như Chung cư Bưu Điện, 122 Tam Đảo, 464/45 Hòa Hảo…), phân hệ Địa chính tích hợp AI OCR tự động quét ảnh sổ đỏ, bóc tách bảng tọa độ góc ranh VN-2000 và dựng hình thửa đất, hỗ trợ xuất bản vẽ trích đo khổ A4/A3 chuẩn quy định.

3.3. Giám sát môi trường, PCCC hẻm sâu và quản lý nghĩa vụ thuế

LSMS bản đồ hóa các điểm đen ô nhiễm (252 Lý Thường Kiệt, 197 Ngô Quyền), có thể kết nối API với phần mềm Grac để quản lý trạng thái nộp phí dịch vụ vận chuyển rác thải của từng hộ gia đình. Trong công tác PCCC, hệ thống hiển thị chính xác vị trí các trụ nước chữa cháy và tự động cảnh báo các hẻm nhỏ có chiều rộng mặt đường < 3,0 m để lực lượng chức năng lập phương án điều xe chữa cháy cơ động.

Phân hệ Thuế định vị 3.535 hộ kinh doanh và 3.300 doanh nghiệp trên bản đồ mật độ, phân loại ngành nghề và hiển thị trạng thái nghĩa vụ thuế theo mã màu (Xanh: Đã nộp; Đỏ: Nợ quá hạn). Người dân có thể quét mã QR trên giấy thông báo để thanh toán thuế phi nông nghiệp trực tuyến.



Hình 2. DEMO giao diện Bảng điều khiển lãnh đạo và Cổng thông tin bản đồ đô thị LSMS

4. NỀN TẢNG CÔNG NGHỆ VÀ BẢO MẬT

4.1. Cơ chế phân quyền địa bàn (Geo-fencing RBAC) và kiểm toán chuỗi băm

LSMS mở rộng mô hình phân quyền vai trò (RBAC) truyền thống thêm chiều không gian địa lý. Cơ chế Geo-fencing RBAC đảm bảo cán bộ thuộc Khu phố/Thôn chỉ có quyền xem và chỉnh sửa dữ liệu trong phạm vi đơn vị hành chính được giao quản lý. Hệ thống tự động kiểm soát truy cập theo mô hình 3 cấp hành chính (Tỉnh -> Xã/Phường -> Thôn/Khu phố).

Nhằm tuân thủ quy định về minh bạch dữ liệu nhà nước, mọi thao tác cập nhật (CREATE, UPDATE, DELETE) đều phát sinh bản ghi kiểm toán AuditLog mã hóa chuỗi băm mật mã HMAC-SHA256 liên hoàn, ngăn chặn mọi hành vi chỉnh sửa hoặc xóa nhật ký trái phép.

4.2. Đánh giá hiệu quả trước và sau khi triển khai hệ thống

Qua kết quả vận hành thử nghiệm tại phường Diên Hồng, TP.HCM, hiệu quả quản trị đô thị đã có sự chuyển biến rõ rệt trên 5 tiêu chí cốt lõi được tổng hợp tại Bảng 1.

Bảng 1. Đối chiếu hiệu quả quản lý trước và sau khi triển khai hệ thống LSMS

Tiêu chí quản lý	Phương thức truyền thống	Giải pháp hệ thống LSMS
Tra cứu đất đai & Quy hoạch	Lục tìm bản vẽ giấy thủ công; dễ rách, thất lạc hoặc mâu thuẫn số liệu.	Tra cứu tức thời trên bản đồ số; minh bạch 100% dữ liệu quy hoạch cho người dân.
Kiểm soát trật tự xây dựng	Bị động; vi phạm xảy ra mới phát hiện; cưỡng chế tốn kém.	Kiểm soát chủ động từ giai đoạn móng; lập biên bản số hóa có ảnh đính kèm GPS.
Quản lý môi trường & rác	Ghi chép sổ tay; rác tái phát sinh; khó đối soát hộ nộp phí.	Phân loại 3 mức rủi ro; quản lý thu phí rác qua App; tiếp nhận phản ánh qua mã QR.
Ứng phó thiên tai & PCCC	Dựa vào kinh nghiệm cảm quan; khó xác định trụ nước và hẻm hẹp.	Bản đồ cảnh báo ngập; tự động nhận diện hẻm < 3,0 m và định vị trụ nước chữa cháy.
Ra quyết định của lãnh đạo	Chờ báo cáo giấy tổng hợp mất nhiều ngày; số liệu không trực quan.	Nắm bắt toàn diện và tức thời hiện trạng địa bàn trên Bảng chỉ đạo điều hành Leader Dashboard; hỗ trợ ra quyết định nhanh chóng, chính xác, chỉ đạo 1 chạm.

5. KẾT LUẬN

Hệ thống Quản lý Không gian Cấp xã (LSMS) là một giải pháp chuyển đổi số toàn diện, giúp giải quyết triệt để các hạn chế về phân mảnh dữ liệu và thiếu hụt chiều không gian trong quản trị đô thị cơ sở tại Việt Nam. Hệ thống đã tích hợp đồng bộ 8 phân hệ chuyên ngành dựa trên sự kết hợp giữa nền tảng WebGIS (MapLibre GL JS), kiến trúc Mobile GIS ưu tiên ngoại tuyến (Offline-First) và các mô hình Trí tuệ nhân tạo (AI OCR, Chatbot AI RAG) đã mang lại giá trị thiết thực cho cả ba nhóm đối tượng: Hỗ trợ Lãnh đạo chỉ đạo điều hành chủ động, giảm tải trên 50% thời gian tác nghiệp cho chuyên viên và cung cấp cổng tra cứu công khai minh bạch cho người dân.

Trong giai đoạn tiếp theo, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục nâng cấp phân hệ GeoAI ứng dụng các mô hình học sâu (U-Net, DeepLabV3+) trong phân loại ảnh viễn thám UAV, mở rộng trực quan hóa không gian 3D (Digital Twin) qua CesiumJS và kết nối liên thông CSDL không gian cấp xã với Hệ thống Thông tin đất đai Quốc gia (VILIS).

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được hỗ trợ kinh phí và tạo điều kiện triển khai thử nghiệm bởi Trung tâm Nghiên cứu đổi mới sáng tạo - Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP Hồ Chí Minh phối hợp cùng Ủy ban nhân dân phường Diên Hồng, TP Hồ Chí Minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 749/QĐ-TTg ngày 03/6/2020 phê duyệt Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030, 2020.

[2] Chính phủ Việt Nam. Nghị định số 13/2023/NĐ-CP ngày 17/4/2023 về Bảo vệ dữ liệu cá nhân, 2023.

[3] Ủy ban nhân dân phường Diên Hồng. Báo cáo tình hình kinh tế - xã hội, quốc phòng - an ninh 9 tháng và phương hướng nhiệm vụ 3 tháng cuối năm 2026, số 3174/BC-UBND, 2026.

[4] Agrawal, S. and Gupta, R. D. Web GIS and its architecture: A review. Arabian Journal of Geosciences, vol. 10, no. 23, pp. 518-530, 2017, doi: 10.1007/s12517-017-3296-2.

[5] Rajabifard, A., Feeney, M. E. F. and Williamson, I. P. Future directions for SDI development. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 4, no. 1, pp. 11-22, 2002.

■ Ngày nộp bài: 01/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2026

Nghiên cứu hệ thống Webapp quản lý vận tải hàng hóa tích hợp chứng từ giao hàng điện tử trong doanh nghiệp logistics

Research on a freight transportation management Webapp system integrated with ePOD in logistics enterprises

> PGS.TS HOÀNG QUỐC LONG[1,*], PHẠM HỒNG THẮM[2], TRẦN THỊ HƯƠNG GIANG[2], TRƯƠNG LÊ NGÂN HÀ[2], VŨ TRIỆU NGHĨA[2], THS.NCS PHẠM NGỌC VIỆT[2], THS.NCS TRẦN VĂN HIẾU[2,3], TS VŨ MINH TÂM[2]

[1]Học viện Kỹ thuật Quân sự
[2]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[3]Công ty Cổ phần Lagom Việt Nam
[*]Email: hoanglong@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Nhiều doanh nghiệp logistics vừa và nhỏ tại Việt Nam vẫn quản lý vận tải hàng hóa thủ công, chưa số hóa quy trình, thiếu kết nối và cơ chế xác thực dữ liệu. Bài báo đề xuất quy trình sáu bước xây dựng hệ thống Webapp quản lý vận tải hàng hóa tích hợp chứng từ xác nhận giao hàng điện tử (ePOD) phù hợp với hiện trạng doanh nghiệp, bao gồm xác định bộ tiêu chí đánh giá; khảo sát hiện trạng vận hành; phân tích hiện trạng vận hành, đề xuất phương án; xây dựng hệ thống; thử nghiệm và đánh giá hệ thống. Quy trình được áp dụng thử nghiệm mô phỏng cho tuyến vận chuyển từ nhà sản xuất (OEM) đến Nội Bài của Công ty TNHH TOLEAD Logistics (Việt Nam). Kết quả đánh giá sau khi áp dụng mô phỏng hệ thống thể hiện quy trình đã được số hóa, làm sạch dữ liệu và giảm phụ thuộc liên lạc thủ công, từ đó chứng minh được hiệu quả của hệ thống đề xuất và tính phù hợp với quy trình sáu bước.

Từ khóa: Wepapp; quản lý thủ công; số hóa quy trình; ePOD, doanh nghiệp logistics.

ABSTRACT

Many small and medium-sized logistics enterprises in Vietnam rely on manual freight transport management, with limited digitalization, system integration and data verification. This study proposes a six-step procedure for developing a web-based freight transport management system integrated with ePOD. The procedure is applied in a simulation-based case study of a transport route from an original equipment manufacturer (OEM) to Noi Bai International Airport, operated by TOLEAD Logistics Co., Ltd. The results indicate that the proposed system enables process digitalization, improves data quality and reduces reliance on manual communication, demonstrating its potential suitability for small and medium-sized logistics enterprises in Vietnam.

Keywords: Wepapp; operational bottleneck; delivery digitalization; ePOD; logistics enterprises.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Logistics nói chung và vận tải hàng hóa nói riêng đang giữ vai trò then chốt trong chuỗi cung ứng nhằm phát triển và thúc đẩy đổi mới sáng tạo. Tuy nhiên, các nghiên cứu về doanh nghiệp logistics vừa và nhỏ chỉ ra rằng quá trình chuyển đổi số vẫn gặp nhiều rào cản như hạn chế về nguồn lực, thiếu hụt chuyên môn và tâm lý ngại thay đổi, ví dụ như tại Thái Lan [1]. Tình trạng này làm giảm hiệu quả quản lý vận tải, đồng thời gây khó khăn cho việc truy xuất, kiểm soát đơn hàng.

Hệ thống Webapp quản lý vận tải tích hợp ePOD được xem là giải pháp giúp nâng cao hiệu quả vận hành thông qua số hóa quy trình, xác thực dữ liệu và tạo cơ sở cho bài toán dự báo. Trên thế giới, các hệ thống quản lý vận tải thường dựa trên mô hình tối ưu hóa như bài toán định tuyến xe kết hợp thuật toán học máy và thuật toán di truyền [2]. Bên cạnh đó, giao hàng không giấy tờ giúp loại bỏ chứng từ giấy, giảm sai sót nhập liệu và tăng tính minh bạch [3]. Tuy nhiên, nhiều doanh nghiệp logistics vẫn quản lý thủ công hoặc chỉ dùng các hệ thống riêng lẻ, dẫn đến quản lý rời rạc. Một nghiên cứu tại chín doanh nghiệp logistics lớn chỉ ra độ phức tạp của mạng lưới và quy trình là rào cản lớn nhất đối với chuyển đổi số đã đề xuất tích hợp dữ liệu từ hệ thống quản lý vận tải (TMS), hệ thống quản lý kho hàng (WMS), ứng dụng và thiết bị di động để có cái nhìn thống nhất theo thời gian thực [4]. Trong khi đó, việc kết hợp Webapp quản lý vận tải với ePOD vẫn chưa được khai thác rộng rãi, đây là

điểm mới giúp khép kín quy trình số hóa vận tải.

Do đó, bài báo này đề xuất quy trình xây dựng hệ thống quản lý vận tải TMS kết hợp ePOD trên nền tảng Django - framework phát triển web mã nguồn mở, viết bằng ngôn ngữ Python, được tạo ra để đơn giản hóa và tăng tốc quá trình xây dựng ứng dụng web. Framework cung cấp sẵn các công cụ và quy tắc chung cho những tác vụ phổ biến, giúp tập trung vào chức năng của ứng dụng thay vì các chi tiết kỹ thuật phức tạp. Ngoài ra, nghiên cứu xây dựng Webapp còn tích hợp bài toán Travelling Salesman Problem (TSP) chọn ra thứ tự di chuyển đến các điểm giao/trả hàng. Mỗi chặng giữa hai điểm được tích hợp thuật toán A* dùng để tìm tuyến đường đi ngắn nhất. Các phần tiếp theo của bài báo gồm phần tổng quan nghiên cứu trong và ngoài nước. Quy trình xây dựng hệ thống được thể hiện ở Phần 3. Phần 4 trình bày ứng dụng cụ thể trong doanh nghiệp Tolead Logistics Việt Nam. Kết luận và hạn chế của nghiên cứu được chỉ ra trong Phần 5.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC

Trong bối cảnh chuyển đổi số chuỗi cung ứng, giao nhận truyền thống vẫn phụ thuộc vào chứng từ giấy và dễ sai lệch do con người nên các nghiên cứu gần đây tập trung vào số hóa quy trình để tăng tính minh bạch và hiệu quả vận hành [5]. Nhóm nghiên cứu tại Đại học Công nghệ Malaysia (UTM) (2026) thiết kế hệ thống DDIMS cho giao nhận vật liệu xây dựng, ước tính rút ngắn thời gian xác minh mỗi chuyến từ khoảng 45 phút xuống 11 phút nhưng hiệu quả phụ thuộc vào kết nối Internet và thói quen của nhân sự [6].

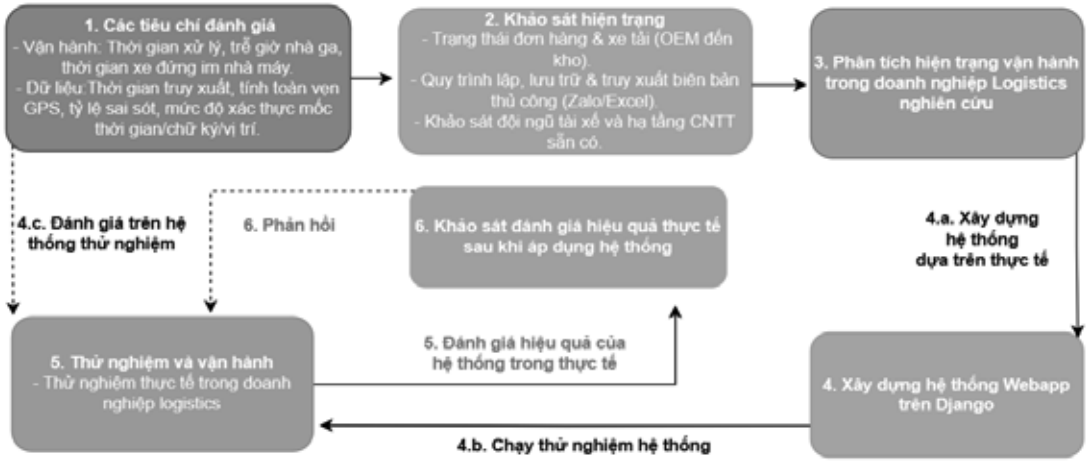
Bên cạnh đó, hệ thống quản lý chuyển phát nhanh trực tuyến được xây dựng trên nền web bằng Django tại Ấn Độ, phân quyền ba vai trò: Người dùng, nhân viên, quản trị viên và cho phép theo dõi hành trình bưu phẩm qua mã định danh. Theo nhóm tác giả, hệ thống giúp tăng tính minh bạch, giảm thời gian, công sức và sai sót so với quy trình thủ công [7].

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về chuyển đổi số trong quản lý vận tải chủ yếu tập trung vào vai trò của số hóa quy trình và các rào cản khi triển khai tại doanh nghiệp logistics. Theo Báo cáo Logistics Việt Nam 2025, dù đa số doanh nghiệp đã nhận thức rõ vai trò của số hóa, hạ tầng công nghệ thông tin và chi phí đầu tư vẫn là rào cản chính khi mở rộng hệ thống [8].

Theo hiểu biết của nhóm tác giả, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu dừng ở khảo sát định tính, đề xuất mô hình lý thuyết hoặc phát triển ứng dụng quản lý mà chưa tích hợp ePOD. Do đó, bài báo này tập trung xây dựng hệ thống Webapp quản lý vận tải tích hợp ePOD kết hợp bài toán TSP và thuật toán A* để tối ưu tuyến đường. Hệ thống nhằm cung cấp mô hình chuyển đổi số toàn diện, minh bạch hóa dữ liệu, giảm rủi ro quản lý và làm sạch dữ liệu trong giao nhận hàng hóa.

3. ĐỀ XUẤT QUY TRÌNH XÂY DỰNG HỆ THỐNG WEBAPP QUẢN LÝ VẬN TẢI TÍCH HỢP EPOD

Quy trình xây dựng hệ thống Webapp quản lý vận tải hàng hóa tích hợp ePOD trong doanh nghiệp logistics gồm 6 bước chính được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Quy trình xây dựng hệ thống Webapp quản lý vận tải tích hợp ePOD

Bước 1: Xác định các tiêu chí đánh giá trong toàn bộ quy trình bao gồm hai nhóm chỉ tiêu chính: (i) Tiêu chí vận hành và (ii) Tiêu chí về kỹ thuật và độ chính xác của dữ liệu. Các tiêu chí này quyết định các loại số liệu cần thu thập và để đánh giá quy trình đề xuất.

Bước 2: Khảo sát hiện trạng vận hành tại doanh nghiệp bao gồm: Quy trình giao nhận và luồng trạng thái; đội ngũ tài xế; hạ tầng công nghệ thông tin sẵn có; yêu cầu báo cáo, lưu trữ và truy xuất dữ liệu.

Bước 3: Phân tích hiện trạng vận hành của doanh nghiệp cần nghiên cứu dựa vào số liệu khảo sát ở bước 2.

Bước 4: Xây dựng chi tiết hệ thống bằng Django Framework với hai phân hệ điều phối và phân hệ tài xế, hiệu chỉnh theo hiện trạng vận hành và các tiêu chí đặt ra (Hình 2). Các chức năng chính gồm phân quyền người dùng, tạo chuyến tối ưu dựa trên việc áp dụng bài toán Travelling Salesman Problem và thuật toán A*, nhận chuyến, cập nhật trạng thái, ký điện tử và tạo ePOD, sau đó được kiểm thử lại để đánh giá hiệu quả của hệ thống tích hợp ePOD. Các giải pháp đề xuất bao gồm tự động hóa cảnh báo sự cố trong quá trình vận chuyển và cho phép ghép nhiều đơn hàng trong một chuyến.

Bước 5: Thử nghiệm và vận hành hệ thống trong doanh nghiệp logistics.



Hình 2. Giao diện trang chủ hệ thống TMS & ePOD với lựa chọn đăng nhập theo phân hệ tài xế và điều phối

Bước 6: Sau khi hệ thống được áp dụng thực tế tại doanh nghiệp logistics, khảo sát các số liệu để đảm bảo có thể đánh giá được các tiêu chí đã xác định ở bước 1. Từ đó thực hiện so sánh, đánh giá được mức độ hiệu quả của hệ thống.

Tuy nhiên, nội dung của nghiên cứu này chỉ thực hiện được mô phỏng hệ thống của một doanh nghiệp logistics nhưng chưa được áp dụng vận hành thực tế tại doanh nghiệp.

4. NGHIÊN CỨU CỤ THỂ

Quy trình sáu bước ở Hình 1 được áp dụng cụ thể trong Tolead Logistics Việt Nam bởi trong một số loại hàng hóa, doanh nghiệp này vẫn đang điều phối quy trình thủ công thông qua gọi điện, lưu dữ liệu thủ công và tạo đơn qua tin nhắn.

Bước 1: Bộ tiêu chí đánh giá được xác định dựa trên hai nhóm tiêu chí nhằm thu thập số liệu trước - sau cho quy trình điều phối vận chuyển chặng OEM đến ga hàng hóa Nội Bài: (i) Tiêu chí vận hành gồm: Thời gian điều phối tạo một đơn hàng, thời gian điều phối gom đơn; thời gian hoàn tất ePOD tính từ lúc mở biểu mẫu ký đến khi hoàn thành đơn (ii) Tiêu chí về kỹ thuật và độ chính xác của dữ liệu bao gồm: Thời gian truy xuất dữ liệu theo cấu trúc.

Bước 2: Khảo sát các số liệu hiện trạng vận hành tại Tolead Logistics Việt Nam bao gồm: (i) Quy trình giao nhận và luồng trạng thái: Phỏng vấn điều phối về quy trình gom đơn qua Zalo/Excel hiện đang căn cứ theo kích thước, tuyến đường hay ga hàng hóa và ghi nhận các trạng thái; (ii) Đội ngũ tài xế: Đánh giá mức độ sử dụng điện thoại thông minh và khả năng thao tác ứng dụng web/di động; (iii) Hạ tầng công nghệ thông tin sẵn có: Thu thập dữ liệu đầu vào có sẵn như nhà máy OEM, ga hàng hóa, thông tin phương tiện của doanh nghiệp; (iv) Yêu cầu báo cáo, lưu trữ và truy xuất: Khảo sát nhu cầu của các bộ phận về các mẫu báo cáo tổng hợp chuyến xe; xác định tiêu chí và tần suất truy xuất lại thông tin dữ liệu để làm cơ sở thiết kế cấu trúc thư mục lưu trữ.

Bước 3: Căn cứ số liệu khảo sát tại Tolead Logistics Việt Nam, hiện trạng vận hành được phân tích như sau:

(i) Quy trình giao nhận và luồng trạng thái: Doanh nghiệp vẫn quản lý thủ công qua Excel và Zalo khiến dữ liệu thiếu đồng bộ, khó truy xuất và thiếu cơ chế sao lưu. Việc ghi nhận trạng thái đơn hàng chưa rõ ràng, chủ yếu dựa trên số liệu ước lượng và thiếu giám sát thời gian thực. Việc gom đơn và tối ưu chuyến chưa hiệu quả dẫn đến tỷ lệ xe chạy rỗng cao và tăng chi phí vận hành.

(ii) Đội ngũ tài xế: Tiếp nhận và phản hồi thông tin chủ yếu thông qua tin nhắn và cuộc gọi, chưa có hệ thống để chủ động cập nhật trạng thái chuyến. Một số tài xế lớn tuổi gặp rào cản thao tác trên thiết bị thông minh, gây kéo dài thời gian trao đổi.

(iii) Hạ tầng công nghệ thông tin sẵn có: Doanh nghiệp này đã có cơ sở dữ liệu nền tảng về danh sách nhà máy OEM, 3 kho khu vực Nội Bài cùng thông tin phương tiện, tài xế, đơn hàng và ảnh chụp lô hàng trước mỗi chuyến vận tải.

(iv) Yêu cầu báo cáo, lưu trữ và truy xuất dữ liệu: Dữ liệu và hình ảnh vận tải còn lưu phân tán trên Zalo, Gmail và Excel, gây khó khăn cho việc tra cứu. Khảo sát hiện trạng tại Tolead Logistics Việt Nam cho thấy các bộ phận có nhu cầu tra cứu theo mã đơn, biển xe và thời gian giao thực tế.

Bước 4: Dựa trên kết quả khảo sát và phân tích nghiệp vụ tại Tolead Logistics Việt Nam, hệ thống Webapp được xây dựng trên nền tảng Django gồm hai phân hệ: Phân hệ dành cho điều phối và tài xế.

(i) Về luồng nghiệp vụ, Webapp cung cấp cho điều phối viên các công cụ quản lý đơn hàng toàn diện, gồm khởi tạo, cập nhật, tra cứu và lọc đơn theo chuỗi trạng thái và từng giai đoạn. Hệ thống hỗ trợ quản lý chuyến, tạo đơn và gom nhiều đơn cùng một chuyến xe dựa trên kích thước đơn hàng, tuyến vận chuyển hoặc ga hàng hóa. Hệ thống tích hợp bài toán TSP và thuật toán A* để tìm ra thứ tự chặng đường gom đơn và chọn ra con đường ngắn nhất cho mỗi chặng. Trong quá trình vận chuyển, điều phối viên có thể theo dõi các chuyến xe theo thời gian thực và tiếp nhận tức thì báo cáo sự cố từ tài xế. Về phía tài xế, Webapp cho phép tiếp nhận chuyến, chủ động cập nhật trạng thái phương tiện theo tiến độ đơn hàng và gửi báo cáo sự cố trực tiếp trên hệ thống.

(ii) Về cơ chế xử lý chứng từ, lưu trữ và kiểm thử an toàn dữ liệu, khi tài xế hoàn tất giao hàng tại ga hàng hóa, Webapp hiển thị biểu mẫu ePOD để điều phối viên ký xác nhận. Ngay sau khi ký, hệ thống tự động đóng mốc thời gian thực, tên tài xế, biển số xe, số seal và ảnh chụp lô hàng; đồng thời, tạo hình ảnh ePOD hoàn chỉnh dưới dạng tệp chuẩn hóa và lưu vào cơ sở dữ liệu. Dữ liệu trạng thái, vị trí và sự cố được đồng bộ gần như tức thời về hệ thống trung tâm. Chức năng nhật ký và sao lưu định kỳ ghi nhận lịch sử thao tác, bảo đảm tính toàn vẹn và chống mất mát dữ liệu.

Bước 5: Webapp xây dựng trên nền tảng Django được triển khai mô phỏng thực tế tại Tolead Logistics Việt Nam nhằm kiểm chứng tính ổn định, độ tin cậy và hiệu quả vận hành. Quá trình kiểm thử bao quát toàn bộ chức năng của hai phân hệ điều phối và tài xế, sử dụng dữ liệu thực gồm danh mục nhà máy OEM, 3 ga hàng hóa tại sân bay Nội Bài, danh sách đơn hàng và các chuyến xe. Kịch bản thử nghiệm theo chuỗi tác nghiệp khép kín: Điều phối tạo đơn, gom đơn và tạo chuyến; tài xế nhận chuyến, cập nhật trạng thái, ghi nhận vị trí giao và báo cáo sự cố; cuối cùng là ký duyệt ePOD và truy xuất dữ liệu, trong khi điều phối theo dõi tiến độ theo thời gian thực.

Trọng tâm thực nghiệm là quy trình xử lý ePOD. Sau khi tài xế hoàn tất giao hàng tại ga hàng hóa, biểu mẫu ePOD hiển thị trên Webapp và chỉ điều phối viên có thẩm quyền mới được ký xác nhận. Ngay sau khi ký, hệ thống tự động đóng mốc thời gian thực, họ tên tài xế, biển số xe, mã seal và ảnh chụp lô hàng, đồng thời tạo hình ảnh ePOD hoàn chỉnh dưới dạng tệp chuẩn hóa và lưu trữ có cấu trúc vào cơ sở dữ liệu.

Nghiên cứu đánh giá hệ thống qua kiểm thử chức năng, mức độ dễ sử dụng của giao diện di động, độ rõ nét và tính xác thực của tệp ePOD, dữ liệu được làm sạch cùng khả năng truy xuất lịch sử chuyến vận tải. Đồng thời, hiệu quả trước và sau triển khai được so sánh theo chỉ số: Thời gian tạo một đơn và gom đơn, thời gian giao nhận tại điểm giao, thời gian hoàn tất ePOD và thời gian truy xuất dữ liệu, làm cơ sở thực chứng để chỉ ra hạn chế và đề xuất hướng hoàn thiện.

Bước 6: Sau khi mô phỏng Webapp cho Tolead Logistics Việt Nam, kết quả đánh giá các tiêu chí (bước 1) giữa mô phỏng và thực trạng được tổng hợp chi tiết tại Bảng 1 và 2.

Bảng 1. Kết quả đánh giá các tiêu chí vận hành tại Tolead Logistics Việt Nam

Tiêu chí vận hành	Quy trình thủ công hiện trạng	Áp dụng mô phỏng Webapp	Mức cải thiện
Thời gian điều phối tạo một đơn	120 giây	67,05 giây	44,13%
Thời gian điều phối gom đơn	300 giây	15,45 giây	94,85%
Thời gian hoàn tất ký bàn giao	30 giây	28,8 giây	4%

Bảng 2. Kết quả đánh giá các tiêu chí kỹ thuật và độ chính xác dữ liệu

Tiêu chí kỹ thuật và độ chính xác dữ liệu	Quy trình thủ công	Áp dụng mô phỏng Webapp	Mức cải thiện
Thời gian truy xuất dữ liệu lưu trữ	17 phút	18,78 giây	98,16%

Kết quả tại Bảng 1 và 2 cho thấy việc áp dụng Webapp giúp rút ngắn thời gian thực hiện các quy trình được khảo sát. Thời gian điều phối tạo một đơn hàng giảm từ 120 giây xuống 67,05 giây, tương ứng 44,13%; thời gian gom đơn giảm từ 300 giây xuống 15,45 giây, tương ứng 94,85%. Thời gian truy xuất dữ liệu giảm từ 17 phút xuống 18,78 giây, tương ứng 98,16%, cho thấy lợi ích của việc tổ chức và lưu trữ dữ liệu tập trung đối với hoạt động tra cứu. Trong khi đó, thời gian hoàn tất ký bàn giao chỉ giảm từ 30 giây xuống 28,8 giây, tương ứng 4%. Kết quả này cho thấy mức cải thiện về thời gian tập trung chủ yếu ở khâu gom đơn và truy xuất dữ liệu, còn thao tác ký bàn giao thay đổi ít. Bên cạnh yếu tố thời gian, chức năng ePOD hỗ trợ tập hợp thông tin giao nhận và chứng từ điện tử để phục vụ lưu trữ, đối chiếu.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đề xuất quy trình 6 bước xây dựng Webapp quản lý vận tải tích hợp ePOD cho doanh nghiệp logistics, dựa trên hiện trạng vận hành thực tế nhằm đáp ứng yêu cầu chuyển đổi số, minh bạch dữ liệu và giảm rủi ro trong giao nhận. Việc áp dụng quy trình tại Công ty TNHH TOLEAD Logistics (Việt Nam) và mô phỏng hệ thống cho thấy khả năng hỗ trợ số hóa các quy trình điều phối, giao nhận và truy xuất dữ liệu trên một nền tảng thống nhất. Hệ thống kết nối hai phân hệ điều phối và tài xế, đồng thời tích hợp chứng từ giao nhận điện tử vào luồng xử lý đơn hàng. Đây là cơ sở để doanh nghiệp logistics có thể ứng dụng triển khai thực tế.

Tuy nhiên, hệ thống còn hạn chế do phạm vi thử nghiệm mô phỏng chưa bao phủ nhiều tuyến vận chuyển và chức năng định vị phụ thuộc vào Internet cũng như API bên ngoài. Hướng nghiên cứu tiếp theo là mở rộng thử nghiệm nhiều tuyến đường, bổ sung cơ chế lưu trữ tạm thời và đồng bộ khi có kết nối, giảm phụ thuộc API định vị, đồng thời tối ưu thuật toán gom đơn và gợi ý tuyến đường để giảm tỷ lệ chuyến chạy rỗng.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn Công ty TNHH TOLEAD Logistics (Việt Nam) đã cung cấp số liệu chỉ để phục vụ mục đích nghiên cứu. Bốn tác giả trong nghiên cứu này là sinh viên đang thực hiện NCKH sinh viên cấp trường có mã số đề tài CĐ-2026-08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Areerakulkan, N., & Sumrit, D. Elucidating critical success factors for digital transformation in logistics service providers using a grey-DANP approach: Insights from the Thai SMEs road freight transportation sector. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 11(2), 100549, 2025, https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100549.

[2] Kozerska, M. Using artificial intelligence for route optimization and planning. Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series, 123-140, 2025, https://doi.org/10.29119/1641-3466.2025.236.8.

[3] Stefansson, G., & Tilanus, B. Process integration for paperless delivery using EPC compliance. Journal of Manufacturing Technology Management, 20(6), 866-882, 2009, https://doi.org/10.1108/17410380910975122.

[4] Cichosz, M., Wallenburg, C. M., & Knemeyer, A. M. Digital transformation at logistics service providers: barriers, success factors and leading practices. The International Journal of Logistics Management, 31(2), 209-238, 2020, https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2019-0229.

[5] Iazza, W., El Aissami, I., Aba-Talib, K., Saloumi, S., & Zouine, A. Impact of Digital Transformation on Logistics: A Systematic and Bibliometric Literature Review. Ianna Journal of Interdisciplinary Studies, 8(2), 670-687, 2026, https://iannajournalofinterdisciplinarystudies.com/index.php/1/article/view/1790.

[6] Leong, L. K., Yusoff, M. S. B. M., Mohamad, N. M. A. B., Asri, N. A. S. B. M., Yin, C. H., Ismail, F., & Mohd, N. I. A Digital Delivery Order System for Construction Materials: System Design and Development. International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS), 10(14), 594-606, 2026, https://doi.org/10.47772/IJRISS.2026.1014MG0047.

[7] Devadiga, R., Deekshitha, V., Pradeesh, & Gavadi, R. Online courier management. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 10(4), 1846-1851, 2023. Internet: https://www.irjet.net/archives/V10/i4/IRJET-V10I4279.pdf.

[8] Bộ Công Thương. Báo cáo Logistics Việt Nam 2025. NXB. Công Thương, 2025. Internet: https://proship.vn/wp-content/uploads/2026/03/Bao-cao-Logistics-Viet-Nam-2025.pdf.

■Ngày nhận bài:15/9/2026 ■Ngày sửa bài: 29/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 03/11/2026

Thấu hiểu khách hàng dựa trên trí tuệ nhân tạo và đổi mới marketing trong doanh nghiệp xây dựng

AI-driven customer insight and marketing innovation in construction firms

> TS NGUYỄN ĐỨC TÂM[1], THS NGUYỄN ĐỨC LÂM[2,*], THS NGUYỄN HỮU ANH[3]
[1]Khoa Quản trị - Tài chính, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Ủy ban nhân dân phường Lê Đại Hành, TP Hải Phòng; [*]Tác giả liên hệ: Email: duclam2809@gmail.com
[3]Thuế TP Hải Phòng

TÓM TẮT

Các doanh nghiệp xây dựng có chu kỳ tiếp cận khách hàng kéo dài, nhu cầu gắn với từng dự án và nhiều chủ thể cùng tham gia quyết định. Trong bối cảnh chuyển đổi số, trí tuệ nhân tạo (AI) tạo điều kiện khai thác dữ liệu khách hàng, hồ sơ dự án và phản hồi sau bàn giao, nhưng kết quả phân tích không tự động dẫn đến đổi mới marketing. Bài viết sử dụng tổng quan tài liệu tích hợp có định hướng để phân tích hai cơ chế chuyển hóa thấu hiểu khách hàng dựa trên AI trong doanh nghiệp xây dựng: khai thác tri thức và quan hệ khách hàng hiện hữu; khám phá nhu cầu, phân khúc và dịch vụ mới. Kết quả tổng hợp cho thấy hướng khai thác phù hợp với việc sàng lọc cơ hội dự án, cá thể hóa đề xuất dịch vụ và duy trì quan hệ chủ đầu tư; hướng khám phá cần thêm diễn giải chuyên môn, đối thoại khách hàng và thử nghiệm giải pháp trước khi triển khai rộng. Bài viết đề xuất khung khái niệm cùng các tình huống ứng dụng theo vòng đời dự án, làm rõ vai trò của AI như công cụ hỗ trợ quyết định kinh doanh trong xây dựng thay vì thay thế phán đoán của nhà quản trị.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo; doanh nghiệp xây dựng; thấu hiểu khách hàng; marketing dự án; đổi mới marketing.

ABSTRACT

Construction firms interact with clients through long project cycles, project-specific requirements, and multiple decision-making stakeholders. As digital transformation advances, artificial intelligence (AI) can support the analysis of client information, project records, and post-handover feedback, but analytical outputs do not automatically lead to marketing innovation. This paper employs a targeted integrative literature review to examine two pathways through which AI-driven customer insights may contribute to construction firms' marketing: exploiting existing client knowledge and relationships, and exploring new needs, market segments, and service offerings. The synthesis suggests that exploitation is more directly connected to project opportunity screening, tailored service proposals, and client relationship management. Exploration additionally requires domain-specific interpretation, client dialogue, and small-scale validation before wider implementation. A conceptual framework and illustrative project-lifecycle applications are proposed. The analysis positions AI as a decision-support capability in construction marketing rather than a substitute for managerial judgment.

Keywords: Artificial intelligence; construction firms; customer insight; project marketing; marketing innovation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chuyển đổi số trong lĩnh vực xây dựng không chỉ liên quan đến thiết kế, thi công hay quản lý tiến độ mà còn đặt ra yêu cầu thay đổi cách doanh nghiệp nhận diện nhu cầu và tiếp cận khách hàng. Chiến lược chuyển đổi số của Bộ Xây dựng giai đoạn 2025 - 2030 và Đề án chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2024 - 2025, định hướng đến năm 2030, tạo bối cảnh chính sách cho việc mở rộng sử dụng dữ liệu và công nghệ trong hoạt động ngành [1, 2].

Marketing trong xây dựng có những điểm khác với marketing hàng tiêu dùng. Khách hàng có thể là chủ đầu tư, bên thuê tư vấn thiết kế, đơn vị đặt hàng thi công hoặc tổ chức có nhu cầu xây dựng công trình. Nghiên cứu về marketing dự án chỉ ra vai trò đồng thời của việc giành cơ hội kinh doanh và duy trì quan hệ với khách hàng hiện hữu; tổng quan về quản trị quan hệ trong dự án xây dựng cũng nhấn mạnh đặc điểm hợp tác đa bên [3, 4].

Công nghệ AI mở rộng khả năng phân tích thông tin khách hàng, tổng hợp dữ liệu phi cấu trúc và hỗ trợ lựa chọn phương án marketing [5, 6]. Đối với doanh nghiệp xây dựng, nguồn thông tin có thể bao gồm yêu cầu của chủ đầu tư được phép sử dụng, lịch sử trao đổi

thương mại, phản hồi trong quá trình thực hiện hợp đồng, đánh giá sau nghiệm thu và thông tin dự án đã được công khai. Dù vậy, khả năng xử lý dữ liệu tốt hơn chưa bảo đảm doanh nghiệp sẽ xác định đúng một nhu cầu mới hay phát triển được dịch vụ có giá trị.

Lý thuyết học hỏi tổ chức phân biệt khai thác tri thức hiện hữu với khám phá những khả năng mới [7, 8]. Trong marketing, nghiên cứu của Wang và cộng sự [9] đã cho thấy vai trò trung gian của năng lực kết hợp hai định hướng này giữa AI mã thấp và đổi mới. Vấn đề của bài viết là vận dụng phân biệt này vào đặc thù ngành Xây dựng: AI giúp doanh nghiệp làm tốt hơn các hoạt động dự án đang có như thế nào, và trong điều kiện nào AI hỗ trợ phát hiện cơ hội dịch vụ, nhóm khách hàng hoặc phân khúc công trình mới.

Các nghiên cứu về AI đã chứng minh khả năng khai thác dữ liệu do khách hàng tạo ra và hỗ trợ phát triển ý tưởng marketing [10, 11]. Đáng chú ý, một nghiên cứu gần đây trong lĩnh vực xây dựng đã sử dụng xử lý ngôn ngữ tự nhiên để kết nối yêu cầu văn bản của khách hàng với mô hình thông tin công trình (BIM) [12]. Trường hợp này cho thấy khả năng xử lý nhu cầu khách hàng bằng AI trong bối cảnh chuyên ngành, nhưng không đồng nghĩa hệ thống kỹ thuật đã tự xác định được cơ hội marketing. Bên cạnh đó, khảo sát quốc tế của RICS [13] cho thấy doanh nghiệp xây dựng còn gặp trở ngại về kỹ năng, tích hợp hệ thống và chất lượng dữ liệu khi ứng dụng AI.

Bài viết hướng tới hai mục tiêu: (i) phân tích các cơ chế mà thấu hiểu khách hàng dựa trên AI hỗ trợ khai thác và khám phá trong marketing tại doanh nghiệp xây dựng; (ii) đề xuất khung khái niệm và các ứng dụng quản trị theo vòng đời dự án. Phạm vi tập trung vào doanh nghiệp cung cấp dịch vụ tư vấn, thiết kế và thi công xây dựng, trong đó quan hệ với chủ đầu tư hoặc bên đặt hàng là trọng tâm; không xem marketing bất động sản bán lẻ là đối tượng nghiên cứu chính.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KHUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Đặc thù khách hàng và marketing trong xây dựng

Khách hàng của một nhà thầu không nhất thiết là người sử dụng cuối cùng của công trình. Trong nhiều dự án, yêu cầu của bên đặt hàng được hình thành qua thảo luận giữa chủ đầu tư, tư vấn thiết kế, bộ phận kỹ thuật, tài chính và đơn vị vận hành. Hoạt động marketing không kết thúc khi ký hợp đồng mà tiếp tục trong triển khai, nghiệm thu và chăm sóc sau bàn giao [3, 4].

Tính chất dự án tạo ra hai đặc điểm ảnh hưởng trực tiếp đến thấu hiểu khách hàng. Thứ nhất, quyết định mua thường có ít lần lặp lại và nhiều người tham gia, khiến dữ liệu giao dịch đơn thuần không đủ để giải thích nhu cầu. Thứ hai, doanh nghiệp cần kết hợp dữ liệu với hiểu biết của nhân sự kinh doanh, kỹ thuật và quản lý dự án.

2.2. Thấu hiểu khách hàng dựa trên AI

Trong bài viết này, thấu hiểu khách hàng dựa trên AI được hiểu là những nhận định có thể sử dụng để hỗ trợ quyết định về nhu cầu, tiêu chí lựa chọn và giá trị kỳ vọng của chủ đầu tư hoặc bên đặt hàng, được hình thành hoặc tăng cường nhờ phân tích dữ liệu bằng AI. Năng lực AI có thể đóng góp cho khả năng sáng tạo của tổ chức, nhưng kết quả phụ thuộc vào cách doanh nghiệp sử dụng năng lực đó [5, 6, 14].

Với doanh nghiệp xây dựng, dữ liệu đầu vào có thể gồm hồ sơ chăm sóc khách hàng (CRM), các yêu cầu kỹ thuật được phép xử lý, biên bản trao đổi, báo cáo xử lý phát sinh, ý kiến sau nghiệm thu và thông tin mời thầu đã công khai. Tuy nhiên, các thông tin liên quan đến thiết kế, hợp đồng và khách hàng có thể chứa bí mật thương mại; việc sử dụng AI phải tuân thủ quyền truy cập, nghĩa vụ bảo mật và quy trình phê duyệt nội bộ. Đầu ra AI không thể thay thế kết luận kỹ thuật hoặc pháp lý có trách nhiệm của người có thẩm quyền.

2.3. Khai thác và khám phá trong marketing dự án

Khai thác là việc sử dụng tốt hơn tri thức, quan hệ và năng lực đang có; khám phá là tìm kiếm, thử nghiệm những giải pháp hoặc phân khúc chưa được doanh nghiệp kiểm chứng. Theo March [7], hai định hướng có cơ chế học hỏi và mức độ bất định khác nhau; O'Reilly và Tushman [8] nhấn mạnh yêu cầu tổ chức có khả năng duy trì đồng thời hai chiều hoạt động. Trong doanh nghiệp xây dựng, ranh giới này thể hiện rõ ở các quyết định phát triển thị trường.

Khai thác có thể là phân loại khách hàng theo loại dự án, nhận diện chủ đầu tư có nhu cầu tái hợp tác, cải thiện cách phản hồi hồ sơ yêu cầu hoặc lựa chọn gói dịch vụ phù hợp với năng lực thi công hiện có. Khám phá là tìm kiếm nhu cầu của nhóm chủ đầu tư chưa từng phục vụ, thử nghiệm dịch vụ cải tạo - nâng cấp hoặc đề xuất dịch vụ hỗ trợ vận hành và bảo trì sau bàn giao.

2.4. Các mệnh đề nghiên cứu

AI thường có đường tác động trực tiếp hơn đối với khai thác vì doanh nghiệp đã sở hữu dữ liệu và tiêu chí đánh giá tương đối ổn định. Ví dụ, tổng hợp lịch sử yêu cầu của một nhóm chủ đầu tư có thể giúp điều chỉnh hồ sơ giới thiệu năng lực hoặc quy trình tiếp nhận yêu cầu.

Mệnh đề 1 (MĐ1). *Thấu hiểu khách hàng dựa trên AI hỗ trợ tích cực cho khai thác marketing tại doanh nghiệp xây dựng thông qua việc sử dụng hiệu quả hơn dữ liệu dự án và tri thức về khách hàng hiện hữu.*

Đối với khám phá, công nghệ có thể phát hiện những yêu cầu chưa được giải quyết, như nhu cầu công trình tiết kiệm năng lượng, cải tạo công năng hoặc giải pháp quản lý vận hành. Tuy nhiên, từ một tín hiệu văn bản đến một thị trường có khả năng chi trả còn khoảng cách đáng kể; doanh nghiệp cần trao đổi với chủ đầu tư, kiểm tra khả thi kỹ thuật và thử nghiệm gói giá trị [10, 11, 12].

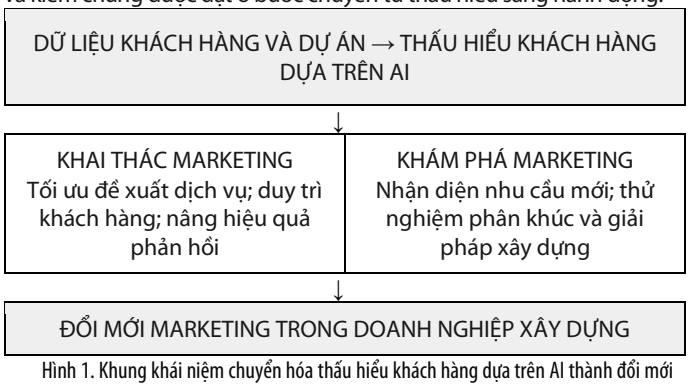
Mệnh đề 2 (MĐ2). *Thấu hiểu khách hàng dựa trên AI có thể hỗ trợ khám phá cơ hội marketing mới trong doanh nghiệp xây dựng; tác động này phụ thuộc nhiều vào diễn giải chuyên môn và kiểm chứng nhu cầu thực tế.*

Trong khai thác, đổi mới thường thể hiện qua cải tiến quy trình phản hồi khách hàng, kết hợp dịch vụ hoặc nâng cao chất lượng đề xuất hợp đồng. Trong khám phá, đổi mới có thể biểu hiện ở việc đưa ra dịch vụ mới hoặc tiếp cận nhóm dự án chưa từng phục vụ. Đây là hai cơ chế có thể bổ sung cho nhau, phù hợp với lập luận về năng lực marketing hai chiều [8, 9].

Mệnh đề 3 (MĐ3). *Khai thác marketing có quan hệ tích cực với đổi mới marketing mang tính cải tiến tại doanh nghiệp xây dựng.*

Mệnh đề 4 (MĐ4). *Khám phá marketing có quan hệ tích cực với đổi mới marketing thông qua việc hình thành và thử nghiệm phân khúc, giải pháp hoặc dịch vụ xây dựng mới.*

Bốn mệnh đề trên là lập luận khái niệm chưa được kiểm định bằng dữ liệu doanh nghiệp. Hình 1 khái quát con đường chuyển hóa từ thông tin khách hàng đến đổi mới marketing; điều kiện chuyên môn, bảo mật và kiểm chứng được đặt ở bước chuyển từ thấu hiểu sang hành động.



Hình 1. Khung khái niệm chuyển hóa thấu hiểu khách hàng dựa trên AI thành đổi mới marketing trong doanh nghiệp xây dựng

Ghi chú: Năng lực chuyên môn, kiểm soát bảo mật và hoạt động kiểm chứng của doanh nghiệp ảnh hưởng đến việc chuyển thấu hiểu thành hành động, đặc biệt ở hướng khám phá.

Bảng 1. Các nghiên cứu tiêu biểu và ý nghĩa đối với marketing trong xây dựng

Nguồn	Kết quả hoặc lập luận chính	Ý nghĩa đối với bài viết
Turner và cộng sự (2019) [3]	Marketing của nhà thầu gắn với việc giành hợp đồng và duy trì quan hệ theo vòng đời dự án.	Xác định bối cảnh marketing dự án và khách hàng B2B.
Daboun và cộng sự (2023) [4]	Quan hệ trong xây dựng có nhiều chiều cạnh về hợp đồng, quản trị, đội ngũ và hợp tác.	Nhấn mạnh nhu cầu diễn giải thông tin trong quan hệ đa bên.
Wang và cộng sự (2025) [9]	AI mã thấp và đổi mới marketing liên quan đến năng lực cân bằng khai thác - khám phá.	Cung cấp nền tảng lý thuyết; tránh tuyên bố mới về quan hệ tổng quát.
Shah và cộng sự (2026) [12]	NLP hỗ trợ chuyển yêu cầu văn bản của khách hàng thành đầu vào mô hình BIM.	Cho thấy tiềm năng xử lý yêu cầu khách hàng trong ngành, không đồng nhất với marketing.
RICS (2025) [13]	Năng lực nhân sự, tích hợp hệ thống và chất lượng dữ liệu là các rào cản AI được người hỏi nhắc tới.	Gợi ý các điều kiện triển khai AI có trách nhiệm tại doanh nghiệp xây dựng.

Bảng 2. Minh họa khai thác và khám phá marketing trong doanh nghiệp xây dựng

Giai đoạn	Khai thác: sử dụng tốt tri thức hiện có	Khám phá: kiểm chứng cơ hội mới
Tìm kiếm cơ hội dự án	Phân loại nhu cầu của khách hàng dựa trên các loại dự án đã thực hiện.	Phân tích thông tin công khai để nhận diện loại công trình chưa từng phục vụ.
Tư vấn và đề xuất dịch vụ	Tổng hợp các yêu cầu lặp lại để rút ngắn thời gian xây dựng đề xuất.	Thử nghiệm gói tư vấn thiết kế - thi công hoặc dịch vụ mới theo nhu cầu khách hàng.
Triển khai hợp đồng	Phân tích các phản hồi được phép sử dụng để cải thiện phối hợp, thông tin và chăm sóc khách hàng.	Phát hiện yêu cầu mới về quản lý vận hành hoặc giải pháp công trình trong tương lai.
Bàn giao, bảo hành	Phân nhóm vấn đề sau nghiệm thu để nâng chất lượng phản hồi và duy trì quan hệ.	Khảo sát khả năng phát triển dịch vụ bảo trì, cải tạo hoặc nâng cấp công trình.
Đánh giá kết quả	Thời gian phản hồi, số cơ hội phù hợp, tỷ lệ tái hợp tác.	Số giả thuyết được xác minh, số giải pháp thử nghiệm, giá trị được khách hàng chấp nhận.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài viết sử dụng tổng quan tài liệu tích hợp có định hướng (targeted integrative literature review), phù hợp với mục tiêu kết nối các dòng nghiên cứu và phát triển khung lập luận khái niệm thay vì ước lượng tác động nhân quả [15]. Tài liệu được lựa chọn có chủ đích từ ba nhóm: (i) nghiên cứu nền tảng về AI, thấu hiểu khách hàng và học hỏi tổ chức; (ii) nghiên cứu về marketing dự án, quản trị quan hệ khách hàng và ứng dụng AI trong xây dựng; (iii) văn bản định hướng chuyển đổi số ngành xây dựng và báo cáo chuyên ngành đáng tin cậy. Các nhóm từ khóa định hướng gồm "AI-driven customer insight", "marketing ambidexterity", "construction marketing", "project marketing", "construction client requirements" và "artificial intelligence in construction".

Tiêu chí ưu tiên là mức độ liên quan trực tiếp đến câu hỏi nghiên cứu, khả năng xác định nguồn xuất bản và giá trị giải thích cho đặc thù dự án xây dựng. Nội dung được đối chiếu theo bốn chủ đề: loại thông tin khách hàng; ứng dụng AI để khai thác; khả năng hỗ trợ khám phá; và điều kiện chuyển kết quả phân tích thành đổi mới marketing. Đây không phải tổng quan hệ thống theo PRISMA; bài viết không tuyên bố bao quát toàn bộ công trình đã xuất bản hoặc cung cấp bằng chứng thực nghiệm tại doanh nghiệp Việt Nam.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả tổng hợp tài liệu

Khi đặt cạnh nhau, các nghiên cứu marketing và xây dựng cho thấy hai nhận định quan trọng. Trước hết, công nghệ AI có thể giúp doanh nghiệp chuyển dữ liệu thành thông tin có thể hỗ trợ quyết định [5, 6, 10]. Bảng 1 tóm lược các công trình tiêu biểu trực tiếp hỗ trợ lập luận này.

4.2. AI hỗ trợ khai thác khách hàng và dự án hiện hữu

Đối với một nhà thầu đã có lịch sử thực hiện dự án, dữ liệu về quy mô công trình, yêu cầu chất lượng, tiến độ, phản hồi của chủ đầu tư và các lần điều chỉnh hồ sơ có thể giúp nhận diện nhóm khách hàng phù hợp. AI hỗ trợ sắp xếp và tóm tắt các dữ liệu này để bộ phận kinh doanh lựa chọn cơ hội tiếp cận, chuẩn bị hồ sơ giới thiệu năng lực và đề xuất phương thức phối hợp phù hợp với từng loại chủ đầu tư.

Chẳng hạn, doanh nghiệp thi công có thể tổng hợp phản hồi từ các dự án nhà xưởng đã hoàn thành để nhận diện những yêu cầu thường lặp lại về an toàn, thời hạn bàn giao và khả năng mở rộng công năng. Thông tin này giúp điều chỉnh hồ sơ năng lực hoặc quy trình tư vấn cho các khách hàng có đặc điểm tương tự.

Dù vậy, dữ liệu từ những hợp đồng đã thắng thường không đại diện cho tất cả cơ hội trên thị trường. Vì vậy, kết quả phân tích nên được coi là cơ sở hỗ trợ sàng lọc chứ không phải quyết định tự động về khách hàng hoặc cơ hội kinh doanh.

4.3. AI hỗ trợ khám phá nhu cầu và dịch vụ mới

Khám phá xuất hiện khi doanh nghiệp tìm cách trả lời những câu hỏi chưa có lời giải từ hồ sơ dự án trước đây. Ví dụ, các phản hồi về chi phí vận hành, yêu cầu giảm phát thải, cải tạo công trình cũ hoặc bảo trì sau bàn giao có thể gợi ý nhu cầu đối với dịch vụ tư vấn tiết kiệm năng lượng, cải tạo nâng cấp hoặc giải pháp xây dựng theo

vòng đời công trình. AI hỗ trợ tổng hợp và phân nhóm tín hiệu rời rạc để hình thành giả thuyết, song bản thân một cụm từ xuất hiện nhiều trong hồ sơ không chứng minh nhu cầu đủ lớn hoặc doanh nghiệp đủ khả năng đáp ứng.

Quá trình khám phá phù hợp hơn với chuỗi gồm: phát hiện tín hiệu - xác định nhóm khách hàng - đối thoại về nhu cầu - đánh giá khả thi kỹ thuật, pháp lý và tài chính - thử nghiệm đề xuất dịch vụ. Ở mỗi bước, kỹ sư, người phụ trách hợp đồng và nhân sự kinh doanh cần cùng tham gia.

Ví dụ, nếu qua phản hồi sau bàn giao xuất hiện đề nghị hỗ trợ theo dõi hiệu suất sử dụng năng lượng, doanh nghiệp có thể thử nghiệm gói tư vấn đánh giá vận hành với một nhóm khách hàng tự nguyện trước khi xem xét mở rộng. Như vậy, AI giúp giảm chi phí tìm kiếm thông tin, nhưng không loại bỏ rủi ro khám phá thị trường.

4.4. Ứng dụng theo vòng đời dự án xây dựng

Để làm rõ khả năng áp dụng của hai định hướng, Bảng 2 đưa ra những tình huống minh họa gắn với quy trình tìm kiếm, ký kết và thực hiện dự án.

Điểm phân biệt quan trọng là cùng một nguồn dữ liệu có thể phục vụ cả hai hướng. Phản hồi về hiệu suất vận hành công trình có thể được dùng để cải thiện dịch vụ bảo hành hiện hành (khai thác), đồng thời đặt nền tảng cho thử nghiệm dịch vụ giám sát vận hành (khám phá).

4.5. Hàm ý quản trị cho doanh nghiệp xây dựng

Thứ nhất, doanh nghiệp nên bắt đầu từ một vấn đề kinh doanh có thể kiểm chứng thay vì đầu tư AI theo phong trào. Một thử nghiệm quy mô nhỏ có thể tập trung vào việc tổng hợp phản hồi của chủ đầu tư sau bàn giao hoặc phân loại yêu cầu dịch vụ trong hồ sơ khách hàng. Chỉ nên mở rộng khi chỉ số vận hành hoặc giá trị khách hàng được cải thiện rõ ràng. Kinh nghiệm chung về năng lực AI của tổ chức cho thấy hiệu quả không chỉ đến từ sở hữu công nghệ [14].

Thứ hai, cần xác định người chịu trách nhiệm diễn giải đầu ra AI. Bộ phận kinh doanh có thể nhận diện vấn đề khách hàng, nhưng nhân sự kỹ thuật phải đánh giá tính khả thi, bộ phận pháp chế hoặc quản lý hợp đồng kiểm tra giới hạn thông tin và cam kết thương mại. Với dữ liệu hồ sơ thầu, thiết kế, báo giá hoặc thông tin chủ đầu tư, doanh nghiệp chỉ xử lý những tài liệu có quyền sử dụng, không nhập tài liệu mật lên các hệ thống AI thiếu kiểm soát. Mọi quyết định liên quan đến hồ sơ dự thầu và lựa chọn nhà thầu phải tuân thủ quy định cạnh tranh, đấu thầu và bảo mật áp dụng.

Thứ ba, cần phân biệt chỉ số đánh giá khai thác và khám phá. Chỉ số khai thác có thể gồm thời gian đáp ứng yêu cầu, mức độ phù hợp của hồ sơ năng lực, phản hồi khách hàng và số dự án tái hợp tác. Chỉ số khám phá nên tập trung vào chất lượng giả thuyết, số cuộc trao đổi xác minh nhu cầu, mức độ sẵn lòng sử dụng dịch vụ mới và kết quả của các thử nghiệm giới hạn.

Cuối cùng, doanh nghiệp cần lưu lại bài học sau mỗi dự án để xây dựng dữ liệu có thể tái sử dụng. Hồ sơ nên được chuẩn hóa ở mức tối thiểu về nhóm khách hàng, loại công trình, yêu cầu giá trị, vấn đề phát sinh và phản hồi sau bàn giao.

5. KẾT LUẬN

Bài viết vận dụng góc nhìn khai thác - khám phá để giải thích cách thấu hiểu khách hàng dựa trên AI có thể hỗ trợ đổi mới marketing tại doanh nghiệp xây dựng. Đặc thù dự án, quan hệ đa bên và chu kỳ hợp đồng kéo dài khiến giá trị của AI không nằm ở dự báo đơn thuần mà ở khả năng biến thông tin thành quyết định phù hợp với yêu cầu của chủ đầu tư. Trong ngắn hạn, AI có thể hỗ trợ khai thác thông qua phân loại cơ hội dự án, cá thể hóa đề xuất và cải thiện quan hệ khách hàng.

Đóng góp của bài viết là đặt khung khai thác - khám phá trong bối cảnh marketing dự án xây dựng, với các ví dụ theo vòng đời dự án và điều kiện kiểm chứng phù hợp. Nghiên cứu mang tính tổng quan lý thuyết, chưa sử dụng dữ liệu khảo sát doanh nghiệp và chưa kiểm định các mệnh đề về tác động. Các nghiên cứu tiếp theo có thể khảo sát doanh nghiệp tư vấn, thiết kế và thi công để xem xét mức độ áp dụng, lợi ích và rào cản của từng hướng sử dụng AI.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng. Quyết định số 1644/QĐ-BXD ngày 30/9/2025 ban hành Chiến lược chuyển đổi số của Bộ Xây dựng giai đoạn 2025-2030, 2025. Internet: https://moc.gov.vn/vn/Pages/ChiTietVanBan.aspx?TypeVB=1&vID=4749 (truy cập: 10/2026).

[2] Bộ Xây dựng. Quyết định số 926/QĐ-BXD ngày 11/10/2024 phê duyệt Đề án Chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2024 - 2025, định hướng đến năm 2030, 2024. Internet: https://moc.gov.vn/vn/Pages/ChiTietVanBan.aspx?TypeVB=1&vID=4268 (truy cập: 10/2026).

[3] J. R. Turner, L. Lecoeuvre, S. Sankaran, M. Er. Marketing for the project: project marketing by the contractor. International Journal of Managing Projects in Business, vol. 12, no. 1, pp. 211-227, 2019, doi: 10.1108/IJMPB-10-2017-0118.

[4] O. Daboun, A. Md Yusof, A. R. Khoso. Relationship management in construction projects: systematic literature review. Engineering Management Journal, vol. 35, no. 2, pp. 120-143, 2023, doi: 10.1080/10429247.2022.2041962.

[5] T. Davenport, A. Guha, D. Grewal, T. Bressgott. How artificial intelligence will change the future of marketing. Journal of the Academy of Marketing Science, vol. 48, pp. 24-42, 2020, doi: 10.1007/s11747-019-00696-0.

[6] M.-H. Huang, R. T. Rust. A strategic framework for artificial intelligence in marketing. Journal of the Academy of Marketing Science, vol. 49, pp. 30-50, 2021, doi: 10.1007/s11747-020-00749-9.

[7] J. G. March. Exploration and exploitation in organizational learning. Organization Science, vol. 2, no. 1, pp. 71-87, 1991, doi: 10.1287/orsc.2.1.71.

[8] C. A. O'Reilly III, M. L. Tushman. Organizational ambidexterity: past, present, and future. Academy of Management Perspectives, vol. 27, no. 4, pp. 324-338, 2013, doi: 10.5465/amp.2013.0025.

[9] X. Wang, Y. Wang, N. Li, Y. Zhao. Low-code AI enabling marketing innovation: the mediating role of marketing ambidexterity. Journal of Digital Management, vol. 1, art. 12, 2025, doi: 10.1007/s44362-025-00015-4.

[10] A. Timoshenko, J. R. Hauser. Identifying customer needs from user-generated content. Marketing Science, vol. 38, no. 1, pp. 1-20, 2019, doi: 10.1287/mksc.2018.1123.

[11] D. Grewal, C. B. Satornino, T. Davenport, A. Guha. How generative AI is shaping the future of marketing. Journal of the Academy of Marketing Science, vol. 53, pp. 702-722, 2025, doi: 10.1007/s11747-024-01064-3.

[12] S. H. Shah, S. U. Rehman, I. Kim, K.-E. Hwang. Transformer-based framework for mapping client requirements to BIM. Automation in Construction, vol. 181, art. 106601, 2026, doi: 10.1016/j.autcon.2025.106601.

[13] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). Artificial intelligence in construction report, 2025. Internet: https://www.rics.org/news-insights/artificial-intelligence-in-construction-report (truy cập: tháng 10/2026).

[14] P. Mikalef, M. Gupta. Artificial intelligence capability: conceptualization, measurement calibration and empirical study on its impact on organizational creativity and firm performance. Information & Management, vol. 58, no. 3, art. 103434, 2021, doi: 10.1016/j.im.2021.103434.

[15] H. Snyder. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. Journal of Business Research, vol. 104, pp. 333–339, 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

■ Ngày nộp bài: 06/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/11/2026

Nghiên cứu ứng dụng thị giác máy và trí tuệ nhân tạo cho hệ thống tự động phân loại chất lượng ngoại quan của quả cà chua

Research on the application of machine vision and artificial intelligence to an automated system for classifying the external quality of tomatoes

> TS PHẠM THỊ LÝ[1], TS NGUYỄN XUÂN LONG[1,2,*]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Công ty Cổ phần Công nghệ Công nghiệp Bưu chính Viễn thông
[*]Email: longnx@vnpt-technology.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu ứng dụng thị giác máy và học sâu để nhận diện trạng thái ngoại quan và xác định vị trí cuống cà chua, hướng đến tự động hóa kiểm tra chất lượng sau thu hoạch. Bộ dữ liệu ảnh chuyên biệt được xây dựng qua quy trình thu thập, gán nhãn và kiểm soát chất lượng, trong đó cuống được gán nhãn như một đối tượng độc lập. Các kỹ thuật tăng cường dữ liệu được áp dụng để đa dạng hóa tập huấn luyện. Trên cơ sở đó, YOLOv8s được huấn luyện và so sánh với các kiến trúc YOLO khác nhằm đánh giá mức độ phù hợp. Kết quả cho thấy YOLOv8s đạt mAP tổng thể cao nhất, còn YOLOv10n có ưu thế về Precision, Recall và thời gian huấn luyện. Phân tích từng lớp cho thấy hiệu năng nhận diện chưa đồng đều, đặc biệt với cuống và cà chua chín có ngoại hình xấu. Phần mềm nhận diện được xây dựng để trực quan hóa kết quả, qua đó minh họa khả năng ứng dụng. Nghiên cứu cung cấp quy trình xây dựng dữ liệu và cơ sở thực nghiệm để lựa chọn mô hình phục vụ kiểm tra chất lượng cà chua.

Từ khóa: Cà chua; YOLOv8; phát hiện đối tượng; phân loại chất lượng; học sâu; thị giác máy; tăng cường dữ liệu.

ABSTRACT

This study applies computer vision and deep learning to detect tomatoes according to their external appearance and localize their stems, with the aim of automating postharvest quality inspection. A dedicated image dataset is developed through image acquisition, annotation and quality control, with stems annotated as a separate object class. Data augmentation techniques are employed to increase the diversity of the training set. YOLOv8s is then trained and compared with other YOLO architectures to assess its suitability for the task. The results show that YOLOv8s achieves the highest overall mean average precision (mAP), whereas YOLOv10n offers advantages in precision, recall and training time. Class-wise analysis reveals variations in detection performance, with stems and ripe tomatoes with poor external appearance remaining particularly challenging. A detection software application is also developed to visualize model predictions and demonstrate the potential applicability of the approach. This study provides a dedicated dataset development workflow and an empirical basis for selecting detection models for tomato quality inspection and sorting.

Keywords: Tomato; YOLOv8; object detection; quality classification; deep learning; machine vision; data augmentation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc kiểm tra chất lượng ngoại quan của quả cà chua trong quá trình thu hoạch, bảo quản và phân phối là cần thiết với một nền nông nghiệp văn minh. Các đặc điểm như màu sắc, độ chín, hình dạng, tình trạng bề mặt và sự hiện diện của cuống cung cấp thông tin để phân hạng và lựa chọn phương án xử lý sau thu hoạch. Tuy nhiên, kiểm tra thủ công phụ thuộc vào kinh nghiệm người thực hiện và khó duy trì tính nhất quán khi số lượng sản phẩm hoặc điều kiện quan sát thay đổi. Vì vậy, thị giác máy và các phương pháp đánh giá không phá hủy được nghiên cứu nhằm hỗ trợ tự động hóa kiểm tra chất lượng nông sản [1-3].

Các phương pháp đánh giá cà chua bằng hình ảnh đã phát triển từ khai thác đặc trưng thủ công sang học sâu. Arakeri và Lakshmana [4] xây dựng hệ thống thị giác máy phục vụ đánh giá, phân hạng cà chua; Ireri và cộng sự [5] kết hợp đặc trưng hình ảnh với học máy để nhận diện khuyết tật và phân hạng quả. Da Costa và cộng sự [6] sử dụng mạng nơ-ron tích chập để phát hiện khuyết tật ngoại quan, giảm sự phụ thuộc vào thiết kế đặc trưng. Những

nghiên cứu này cho thấy giá trị của ảnh RGB trong đánh giá chất lượng cà chua. Tuy nhiên, phân loại ảnh chủ yếu gán nhãn cho toàn bộ ảnh hoặc mẫu quả, còn phát hiện đối tượng xác định đồng thời vị trí và lớp của từng đối tượng thì hiện tại rất ít có công bố nào nhắc tới. Khả năng này phù hợp với ảnh chứa nhiều quả hoặc đồng thời có quả và cuống cần được nhận diện riêng.

Trong các phương pháp phát hiện đối tượng, họ mô hình You Only Look Once (YOLO) được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng dự đoán vị trí và lớp đối tượng trong cùng quá trình xử lý [7]. Cheng và cộng sự [8] sử dụng YOLOv4 để đánh giá ngoại quan và phân hạng cà chua; Phan và cộng sự [9] kết hợp YOLOv5 với mạng nơ-ron tích chập để phân loại quả; Zeng và cộng sự [10] phát triển mô hình gọn nhẹ hướng đến thiết bị di động. Chen và cộng sự [11] nghiên cứu mô hình đa nhiệm nhận diện độ chín của quả và chùm cà chua bi, trong khi Wang và cộng sự [12] đề xuất NVW-YOLOv8 để phát hiện, phân đoạn quả ở các giai đoạn chín khác nhau. Moya và cộng sự [13] cũng khảo sát YOLOv8 trong phân loại và đánh giá chất lượng cà chua. Các công trình này cho thấy thiết kế mô hình cần gắn với đối tượng khảo sát, hệ thống nhãn và yêu cầu đầu ra. Những nghiên cứu gần với ứng dụng sau thu hoạch tiếp tục mở rộng phạm vi đánh giá sang khuyết tật bề mặt, quan sát đa góc nhìn và vận hành trực tuyến. Li và cộng sự [14] nghiên cứu phát hiện, phân hạng chất lượng ngoại quan cà chua trực tuyến. Đối với kiểm tra ngoại quan sau thu hoạch, cần khảo sát cuống như một đối tượng riêng bên cạnh trạng thái của quả. Do cuống thường nhỏ, mảnh và dễ bị che khuất, khả năng phát hiện và định vị cần được đánh giá độc lập với hiệu năng nhận diện quả.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu của bài báo này xây dựng bộ dữ liệu bảy lớp, gồm 6 trạng thái của quả: Bị dập, chín, chín không cuống, chín có ngoại hình xấu, ương và xanh; cùng một lớp cuống độc lập và sử dụng kỹ thuật trí tuệ nhân tạo để nhận dạng các trạng thái này của quả cà chua để phục vụ phân loại tự động. Đóng góp chính của bài báo này là xây dựng được bộ dữ liệu với hệ thống nhãn quả-cuống, đánh giá đối chiếu các mô hình và phân tích những lớp khó nhận diện, định vị.

2. XÂY DỰNG BÀI TOÁN

2.1. Mô hình hóa bài toán phát hiện đối tượng

Xét ảnh RGB đầu vào $I \in \mathbb{R}^{640\times640\times3}$. Một ảnh có thể đồng thời chứa nhiều quả cà chua và các cuống cà chua quan sát được. Tập nhãn chuẩn được biểu diễn bởi:

$$G(I) = \{(b_i, c_i)\}_{i=1}^{N} \quad (1)$$

Trong đó: N là số đối tượng được gán nhãn; $b_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$ là hộp giới hạn của đối tượng thứ i theo định dạng nhãn YOLO; c_i là nhãn lớp. Sau suy luận và hậu xử lý, mô hình trả về tập dự đoán:

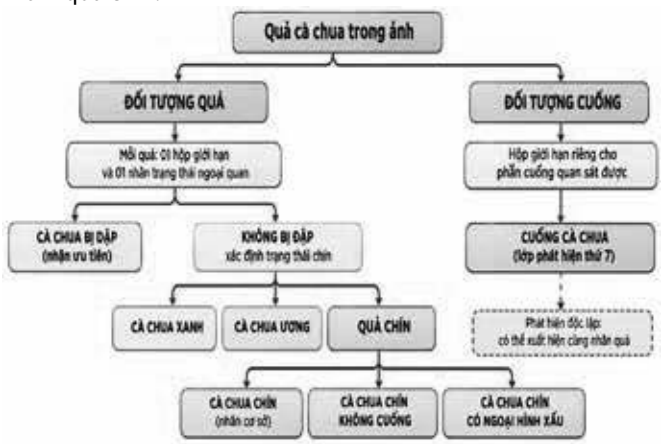
$$D(I) = \left\{\left(\widehat{b_j}, \widehat{c_j}, s_j\right)\right\}_{j=1}^{M} \quad (2)$$

Trong đó: M là số đối tượng phát hiện; $\widehat{b_j}$, $\widehat{c_j}$ và s_j lần lượt là hộp giới hạn dự đoán, nhãn lớp và điểm tin cậy của đối tượng thứ j. Mô hình cần đồng thời xác định vị trí và nhận dạng lớp của từng đối tượng trong ảnh, thay vì chỉ đưa ra một nhãn cho toàn bộ ảnh.

2.2. Lớp dữ liệu và nguyên tắc gán nhãn.

Tập hợp lớp dữ liệu của bài toán gồm bảy lớp, ký hiệu $C = C_f \cup \{c_{\text{stem}}\}$, trong đó C_f gồm sáu trạng thái quả: Bị dập, chín, chín không cuống, chín có ngoại hình xấu, ương, xanh; c_{stem} là lớp cuống quả cà chua. Mỗi quả có một hộp giới hạn và một nhãn trạng thái. Cuống được xem là một đối tượng phát hiện độc lập, có thể xuất hiện đồng thời trong ảnh với một hoặc nhiều trạng thái quả (Hình 1).

Quả có dấu hiệu bị dập được ưu tiên gán lớp bị dập, không phụ thuộc độ chín hoặc cuống. Các quả còn lại được gán theo trạng thái ngoại quan. Nhóm quả chín gồm 3 nhãn nêu trên; trường hợp đồng thời thỏa mãn nhiều tiêu chí cần tuân theo quy tắc ưu tiên thống nhất trong hướng dẫn gán nhãn trong nhóm quả chín.



Hình 1. Sơ đồ phân cấp nhãn gồm 6 trạng thái ngoại quan của quả và một lớp cuống độc lập

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

3.1. Thu thập, gán nhãn và chuẩn hóa dữ liệu

3.1.1. Nguồn và quá trình thu thập dữ liệu

Tập dữ liệu được xây dựng từ các mẫu cà chua thực tế, phục vụ phát hiện trạng thái ngoại quan, bao gồm các giai đoạn chín, khuyết tật bề mặt và sự hiện diện của cuống, tương ứng với 7 lớp đối tượng trong nghiên cứu. Ảnh cà chua được thu bằng camera sau của điện thoại thông minh có độ phân giải tối thiểu 12 megapixel. Bố trí thu nhận sử dụng đèn LED khuếch tán khoảng 5.000 K, độ rọi 500 - 800 lux; khoảng cách chụp 30 - 50 cm và các góc 0°, 45°, 90°. Ảnh JPEG hoặc PNG có độ phân giải gốc tối thiểu 1.920 × 1.080 pixel, được lưu trước khi chuẩn hóa về 640 × 640 pixel. Nghiên cứu sử dụng 675 ảnh gốc, gồm 556 ảnh huấn luyện và 119 ảnh xác thực. Từ tập huấn luyện ban đầu, 2.780 ảnh biến thể được tạo bằng các kỹ thuật tăng cường dữ liệu, nâng tổng số ảnh sử dụng trong huấn luyện lên 3.336 ảnh. Các ảnh biến thể là dữ liệu dẫn xuất, không được tính là mẫu thu thập độc lập.

3.1.2. Gán nhãn và tổ chức dữ liệu

Các đối tượng được gán hộp giới hạn bằng X-AnyLabeling theo danh mục lớp đã xác định tại phần II. Mỗi quả mang một nhãn ngoại quan; cuống được gán riêng. Dữ liệu được rà soát các lỗi bỏ sót, sai nhãn, trùng lặp hoặc hộp không phù hợp, sau đó tổ chức ảnh và tệp nhãn theo định dạng YOLO.

3.1.3. Kiểm tra và kiểm soát chất lượng dữ liệu

Bốn tiêu chí kiểm soát gồm chất lượng ảnh, chất lượng nhãn, ảnh trùng và ảnh gần trùng. Việc rà soát chú ý ảnh mờ, thiếu hoặc quá sáng, che khuất nghiêm trọng, hộp giới hạn và nhãn không phù hợp. Ảnh cùng một quả xuất hiện trong cả hai tập có thể gây rò rỉ dữ liệu, khiến mô hình ghi nhớ đặc điểm của các mẫu đã gặp và dẫn đến kết quả đánh giá cao hơn khả năng tổng quát hóa thực tế, vì vậy cần kiểm tra quan hệ ảnh-cá thể và ưu tiên phân chia theo cá thể.

3.1.4. Phân chia tập dữ liệu

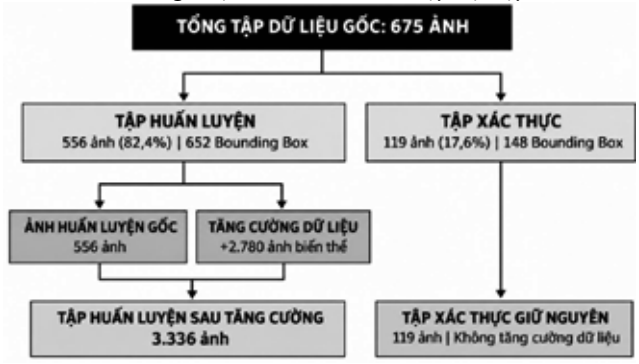
Bộ dữ liệu gồm 675 ảnh gốc: 556 ảnh huấn luyện (82,4%) với 652 hộp giới hạn và 119 ảnh xác thực (17,6%) với 148 hộp. Phân bố theo lớp được trình bày ở Bảng 1. Tập xác thực dùng để lựa chọn trọng số và đánh giá mô hình, chưa có tập kiểm tra độc lập.

Bảng 1. Phân bố ảnh và hộp giới hạn theo lớp

Chỉ tiêu/Lớp	Huấn luyện gốc	Xác thực
Số ảnh	556	119
Số hộp giới hạn (tổng)	652	148
Bị dập	65	10
Chín	24	9
Chín không cuống	148	33
Chín ngoại hình xấu	76	22
Ương	111	23
Xanh	136	25
Cuống	92	26

3.1.5. Tăng cường dữ liệu

Năm nhóm biến đổi gồm xoay, thay đổi chiếu sáng, thêm nhiễu, làm mờ và kết hợp. Chỉ 556 ảnh huấn luyện được tăng cường, tạo thêm 2.780 ảnh dẫn xuất, nâng tổng số lên 3.336 ảnh. Tập xác thực giữ nguyên 119 ảnh, không tăng cường. Các biến đổi mô phỏng thay đổi góc quan sát, chiếu sáng và chất lượng ảnh; ảnh dẫn xuất không được tính là mẫu thu thập độc lập (Hình 2).

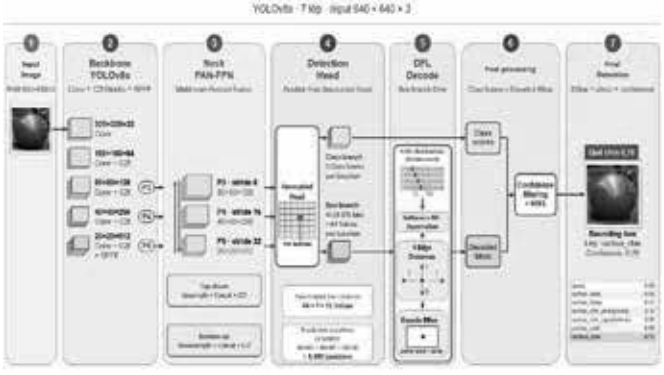


Hình 2. Sơ đồ phân chia tập dữ liệu và tăng cường tập huấn luyện

3.2. Mô hình YOLOv8 Detection bảy lớp

Backbone gồm các phép tích chập Conv, mô-đun C2f và SPPF. Neck sử dụng PAN-FPN để kết hợp đặc trưng; các đầu ra P3, P4, P5 có kích thước 80 × 80 × 128, 40 × 40 × 256, 20 × 20 × 512, tương ứng stride 8, 16, 32 [28, 29].

Detection Head tách nhánh phân lớp với bảy điểm lớp và nhánh hồi quy hộp với 4 × 16 giá trị phân phối, reg_max = 16, liên quan đến Distribution Focal Loss (DFL) [30]. Tổng số vị trí dự đoán là 80 × 80 + 40 × 40 + 20 × 20 = 8.400. Khi suy luận, phân phối hồi quy được chuyển thành bốn khoảng cách để giải mã hộp; các hộp và điểm lớp được lọc bằng NMS [29]. Hình 3 mô tả quy trình này.



Hình 3. Quy trình suy luận của YOLOv8s từ ảnh RGB đến kết quả phát hiện

3.3. Cấu hình và quy trình huấn luyện

YOLOv8s sử dụng Ultralytics 8.4.170, seed 42 và chế độ deterministic; cấu hình được tổng hợp tại Bảng 2. Quá trình huấn luyện trên 3.336 ảnh dừng sau 68 epoch, trọng số tốt nhất ở epoch 48; tổng thời gian khoảng 3.090 giây (51,5 phút).

Bảng 2. Cấu hình huấn luyện mô hình YOLOv8s trong nghiên cứu

Thông số	Giá trị
Bài toán/số lớp	Phát hiện/7
Ảnh đầu vào	640 × 640
Batch/epoch tối đa	16/100
Bộ tối ưu/lr0	AdamW/0,001
Patience/seed	20 epoch/42
GPU	RTX 5060 Ti 16 GB

3.4. Chỉ tiêu đánh giá

Với TP, FP, FN lần lượt là số phát hiện đúng, phát hiện sai và đối tượng bị bỏ sót, Precision (P) và Recall (R) được xác định bởi:

$$P = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FP}}; \quad R = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP} + \mathrm{FN}} \tag{3}$$

Average Precision (AP) tổng hợp đường cong Precision-Recall theo lớp. mAP@0,5 là trung bình AP tại ngưỡng giao trên hợp (IoU) bằng 0,5; mAP@0,5:0,95 lấy trung bình trên các ngưỡng IoU từ 0,50 đến 0,95, bước 0,05.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả huấn luyện

Cả 5 mô hình đều dừng sớm trước 100 epoch. Thời gian huấn luyện của YOLOv8n, YOLOv10n, YOLO26n, YOLOv8s và YOLO11n lần lượt là 35,29; 37,73; 38,52; 51,51 và 55,87 phút. Tại epoch tốt nhất, YOLOv8s có box loss 0,3816, classification loss 0,5478 và DFL loss 1,0165. Loss và thời gian huấn luyện không thay thế kết quả xác thực hoặc phép đo thời gian suy luận khi triển khai.

4.2. Kết quả tổng thể trên tập xác thực

Bảng 3 tổng hợp kết quả trên 119 ảnh xác thực. YOLOv8s đạt mAP@0,5 và mAP@0,5:0,95 cao nhất; YOLOv10n đạt Precision và Recall cao nhất, đứng thứ hai về mAP. Hai chỉ số mAP của YOLOv10n thấp hơn YOLOv8s tương ứng 0,0099 và 0,0119, nhưng thời gian huấn luyện ngắn hơn khoảng 26,8%. Như vậy, YOLOv8s có lợi thế về mAP tổng thể, trong khi YOLOv10n cho thấy sự cân bằng tốt giữa Precision, Recall, mAP và thời gian huấn luyện. Giá trị tốt nhất theo cột ở Bảng 3 và theo hàng ở Bảng 4 - 6 được in đậm.

Bảng 3. Kết quả đánh giá 5 mô hình trên tập xác thực

Mô hình	Precision	Recall	mAP@0,5	mAP@0,5:0,95
YOLO11n	**0,7445**	0,7016	0,7953	0,7023
YOLO26n	0,7549	0,6987	0,7759	0,7045
YOLOv10n	**0,7661**	**0,7632**	0,8017	0,7140
YOLOv8n	0,7248	0,7470	0,7642	0,6907
YOLOv8s	0,7553	0,7580	**0,8116**	**0,7259**

YOLOv8n huấn luyện nhanh nhất nhưng có mAP thấp nhất; YOLO26n có Recall tổng thể thấp nhất, còn YOLO11n không dẫn đầu ở các chỉ số tổng thể và có thời gian huấn luyện dài nhất. Bốn mô hình Nano được đánh giá với ngưỡng confidence 0,001 và IoU 0,7; cấu hình hậu xử lý của lần đánh giá YOLOv8s chưa được lưu

đầy đủ. Vì vậy, thứ hạng phản ánh các lần thực nghiệm đã ghi nhận; cần chuẩn hóa giao thức đánh giá để xác nhận chênh lệch giữa mô hình.

4.3. Phân tích hiệu năng theo từng lớp

4.3.1. AP@0,5:0,95

Bảng 4 cho thấy không có mô hình dẫn đầu ở mọi lớp. YOLOv8s đạt AP@0,5:0,95 cao nhất ở lớp bị dập; YOLOv10n ở lớp chín; YOLO11n ở lớp ương. YOLO26n dẫn đầu ở chín không cuống, chín ngoại hình xấu, xanh và cuống.

Bảng 4. AP@0,5:0,95 theo từng lớp của 5 mô hình

Lớp đối tượng	YOLO11n	YOLO26n	YOLOv10n	YOLOv8n	YOLOv8s
Bị dập	0,7755	0,7407	0,7907	0,7538	**0,8435**
Chín	0,5864	0,5346	**0,7527**	0,7341	0,6498
Chín không cuống	0,7468	**0,7823**	0,7552	0,7127	0,7762
Chín ngoại hình xấu	0,6551	**0,6983**	0,6589	0,6281	0,6664
Ương	**0,8722**	0,8164	0,8326	0,8098	0,8482
Xanh	0,9754	**0,9755**	0,8938	0,9165	0,9476
Cuống	0,3050	**0,3836**	0,3144	0,2797	0,3496

Lớp xanh đạt AP@0,5:0,95 từ 0,8938 đến 0,9755, trong khi cuống chỉ đạt 0,2797 - 0,3836. Cuống có hình dạng nhỏ, mảnh và có thể bị che khuất một phần bởi quả hoặc các đối tượng lân cận. Với đặc điểm này, một sai lệch nhỏ về tọa độ hộp giới hạn cũng có thể làm giảm đáng kể IoU, nhất là ở các ngưỡng cao. Do đó, kết quả ở lớp cuống phản ánh thách thức không chỉ trong nhận dạng mà còn trong định vị chính xác đối tượng có kích thước nhỏ. Lớp chín ngoại hình xấu đạt 0,6281 - 0,6983; màu sắc của nhóm quả này có thể tương đồng với cà chua chín thông thường, trong khi khuyết tật bề mặt có biểu hiện và mức độ khác nhau, làm cho ranh giới giữa các lớp khó phân biệt hơn trên ảnh. Đối với lớp chín, AP@0,5:0,95 biến thiên từ 0,5346 ở YOLO26n đến 0,7527 ở YOLOv10n, cho thấy mức độ nhạy của kết quả đối với lựa chọn kiến trúc ở lớp này lớn hơn so với một số lớp còn lại.

4.3.2. Recall theo từng lớp

Theo Bảng 5, YOLOv8n có Recall cao nhất ở bị dập, chín không cuống và ương; YOLOv10n ở chín; YOLO26n ở chín ngoại hình xấu; YOLOv8s ở cuống. Cả năm mô hình đều đạt Recall 1,0000 ở lớp xanh. Với chín ngoại hình xấu, Recall chỉ đạt 0,2727 - 0,5909, cho thấy nguy cơ bỏ sót cần được xem xét cùng mAP tổng thể.

Bảng 5. Recall theo từng lớp của năm mô hình

Lớp đối tượng	YOLO11n	YOLO26n	YOLOv10n	YOLOv8n	YOLOv8s
Bị dập	0,5798	0,7000	0,8563	**0,9755**	0,9000
Chín	0,5556	0,4320	**0,8862**	0,7738	0,7023
Chín không cuống	0,8182	0,7503	0,7273	**0,8485**	0,5641
Chín ngoại hình xấu	0,5163	**0,5909**	0,5455	0,2727	0,5455
Ương	0,8261	0,7254	0,8261	**0,8969**	0,8919
Xanh	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**
Cuống	0,6154	0,6923	0,5008	0,4615	**0,7025**

4.3.3. Precision và mối quan hệ với Recall

Bảng 6 trình bày Precision theo lớp. YOLO11n dẫn đầu ở bị dập; YOLO26n và YOLOv10n cùng đạt 1,0000 ở chín. YOLOv8s đạt cao nhất ở chín không cuống, ương và cuống; YOLO26n ở xanh; YOLOv8n ở chín ngoại hình xấu.

Bảng 6. Precision theo từng lớp của năm mô hình

Lớp đối tượng	YOLO11n	YOLO26n	YOLOv10n	YOLOv8n	YOLOv8s
Bị dập	**0,8523**	0,5764	0,5875	0,5819	0,6080
Chín	0,7710	**1,0000**	**1,0000**	0,8744	0,7589
Chín không cuống	0,6071	0,6923	0,6426	0,6070	**0,6993**
Chín ngoại hình xấu	0,6941	0,6550	0,6736	**0,7387**	0,6953
Ương	0,7610	0,7354	0,8290	0,7746	**0,8724**
Xanh	0,8558	**0,9080**	0,8175	0,8253	0,8333
Cuống	0,6703	0,7170	0,8127	0,6716	**0,8203**

Ở lớp chín, YOLO26n và YOLOv10n cùng có Precision 1,0000 nhưng Recall lần lượt là 0,4320 và 0,8862. Trong phạm vi tập xác thực, YOLOv10n do đó thể hiện khả năng kết hợp tốt hơn giữa hạn chế dự đoán nhầm và phát hiện các đối tượng thuộc lớp chín. Ở lớp bị dập, YOLOv8n đạt Recall 0,9755 nhưng Precision chỉ 0,5819; với chín ngoại hình xấu, hai chỉ số tương ứng là 0,2727 và 0,7387. Những trường hợp này cho thấy lựa chọn mô hình cần gắn với yêu cầu vận hành: Ưu tiên hạn chế bỏ sót, hạn chế dự đoán nhầm hay cân bằng cả hai tiêu chí. Riêng cuống, YOLOv8s đạt Precision 0,8203, Recall 0,7025 nhưng AP@0,5:0,95 chỉ 0,3496. Sự khác biệt giữa các chỉ số cho thấy mô hình có thể nhận dạng đúng một phần đáng kể đối tượng cuống, nhưng độ khớp của hộp giới hạn giảm khi đánh giá ở các ngưỡng IoU cao. Đây là đặc điểm cần lưu ý khi khai thác thông tin vị trí cuống trong những bước xử lý tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và so sánh năm mô hình YOLO gồm YOLO11n, YOLO26n, YOLOv10n, YOLOv8n và YOLOv8s để phát hiện sáu trạng thái ngoại quan của quả cà chua và một lớp cuống độc lập. Các mô hình được huấn luyện trên tập dữ liệu sau tăng cường gồm 3.336 ảnh với kích thước đầu vào 640 × 640 pixel. Kết quả cho thấy hiệu năng thay đổi theo cả kiến trúc và lớp đối tượng. Vì vậy, lựa chọn mô hình cần dựa trên mục tiêu vận hành thay vì chỉ dựa vào một chỉ số tổng hợp.

Trên tập xác thực nội bộ gồm 119 ảnh và 148 đối tượng, YOLOv8s đạt mAP@0,5 và mAP@0,5:0,95 cao nhất, lần lượt là 0,8116 và 0,7259. YOLOv10n đạt Precision và Recall cao nhất, tương ứng 0,7661 và 0,7632, đồng thời có thời gian huấn luyện ngắn hơn YOLOv8s khoảng 26,8%. Kết quả này cho thấy YOLOv8s có lợi thế về độ chính xác tổng hợp, trong khi YOLOv10n thể hiện sự cân bằng tốt hơn giữa Precision, Recall, mAP và chi phí huấn luyện.

Phân tích theo lớp cho thấy không có mô hình nào dẫn đầu ở toàn bộ bảy lớp. Lớp cà chua xanh đạt Recall bằng 1,0000 ở cả năm mô hình và có AP@0,5:0,95 cao, cho thấy khả năng nhận dạng tương đối ổn định trong điều kiện khảo sát. Ngược lại, lớp cuống và lớp chín ngoại hình xấu có kết quả thấp hơn. Đối với cuống, kích thước nhỏ, hình dạng mảnh và khả năng bị che

khuất làm tăng độ khó định vị tại các ngưỡng IoU cao. Đối với lớp chín ngoại hình xấu, sự đa dạng của khuyết tật bề mặt và độ tương đồng với cà chua chín thông thường làm tăng nguy cơ bỏ sót hoặc nhầm lớp. Do đó, bên cạnh mAP tổng thể, Precision và Recall của các lớp lỗi cần được xem xét khi lựa chọn mô hình cho hệ thống kiểm tra chất lượng.

Các kết quả hiện tại được xác định trên tập xác thực nội bộ có quy mô giới hạn và chưa phản ánh đầy đủ khả năng tổng quát hóa trên dữ liệu độc lập. Nghiên cứu tiếp theo cần xây dựng tập kiểm tra độc lập, chuẩn hóa giao thức đánh giá giữa các mô hình, bổ sung dữ liệu cho các lớp khó và đo thời gian suy luận trên thiết bị mục tiêu. Để triển khai trên dây chuyền, hệ thống cũng cần được kiểm thử dưới các điều kiện chiếu sáng, góc quan sát, mức độ che khuất và mật độ quả khác nhau; đồng thời phát triển các chức năng liên kết quả - cuống, theo dõi đối tượng và điều khiển cơ cấu phân loại. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở kỹ thuật cho việc sử dụng mô hình YOLO như một thành phần thị giác máy trong hệ thống kiểm tra chất lượng cà chua tự động sau thu hoạch.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. Hu, L. Ma, W. Zhang, J. Song, P. Yu. Postharvest fruit grading technologies and equipment: A review. Foods, vol. 15, no. 18, Art. no. 3308, 2026, doi: 10.3390/foods15183308.

[2] B. O. Olorunfemi, N. I. Nwulu, O. A. Adebo, K. A. Kavadias. Advancements in machine visions for fruit sorting and grading: A bibliometric analysis, systematic review and future research directions. Journal of Agriculture and Food Research, vol. 16, Art. no. 101154, 2024, doi: 10.1016/j.jafr.2024.101154.

[3] Y. Huang et al. Overview of deep learning and nondestructive detection technology for quality assessment of tomatoes. Foods, vol. 14, no. 2, Art. no. 286, 2025, doi: 10.3390/foods14020286.

[4] M. P. Arakeri, Lakshmana. Computer vision based fruit grading system for quality evaluation of tomato in agriculture industry. Procedia Computer Science, vol. 79, pp. 426-433, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.03.055.

[5] D. Ireri, E. Belal, C. Okinda, N. Makange, C. Ji. A computer vision system for defect discrimination and grading in tomatoes using machine learning and image processing. Artificial Intelligence in Agriculture, vol. 2, pp. 28-37, 2019, doi: 10.1016/j.aiia.2019.06.001.

[6] A. Z. da Costa, H. E. H. Figueroa, J. A. Fracarolli. Computer vision based detection of external defects on tomatoes using deep learning. Biosystems Engineering, vol. 190, pp. 131-144, 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.12.003.

[7] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi. You only look once: Unified, real-time object detection. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779-788, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

[8] Y.-H. Cheng, C.-Y. Tseng, D.-M. Nguyen, Y.-D. Lin. YOLOv4-driven appearance grading filing mechanism: Toward a high-accuracy tomato grading model through a deep-learning framework. Mathematics, vol. 10, no. 18, Art. no. 3398, 2022, doi: 10.3390/math10183398.

[9] Q.-H. Phan, V.-T. Nguyen, C.-H. Lien, T.-P. Duong, M. T.-K. Hou, N.-B. Le. Classification of tomato fruit using YOLOv5 and convolutional neural network models. Plants, vol. 12, no. 4, Art. no. 790, 2023, doi: 10.3390/plants12040790.

[10] T. Zeng, S. Li, Q. Song, F. Zhong, X. Wei. Lightweight tomato real-time detection method based on improved YOLO and mobile deployment. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 205, Art. no. 107625, 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.107625.

[11] W. Chen, M. Liu, C. Zhao, X. Li, Y. Wang. MTD-YOLO: Multi-task deep convolutional neural network for cherry tomato fruit bunch maturity detection. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 216, Art. no. 108533, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2023.108533.

[12] A. Wang et al. NVW-YOLOv8s: An improved YOLOv8s network for real-time detection and segmentation of tomato fruits at different ripeness stages. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 219, Art. no. 108833, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.108833.

[13] V. Moya, M. Guerra, K. Pazmiño, F. Abedrabbo, F. A. Chicaiza, D. Pozo-Espín. Tomato classification with YOLOv8: Enhancing automated sorting and quality assessment. Smart Agricultural Technology, vol. 12, Art. no. 101221, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101221.

[14] C. Sakunrasrisuay et al. MVT-Grader: Real-time lightweight multi-view CNN with auxiliary loss aggregation for tomato grading. Electronics, vol. 15, no. 12, Art. no. 2618, 2026, doi: 10.3390/electronics15122618.

■ Ngày nộp bài: 02/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/10/2026

Nghiên cứu ứng dụng công nghệ xử lý ảnh và cánh tay robot trong phân loại sản phẩm

Research on the application of image processing technology and robotic arm in product sorting

> THS PHẠM THỊ HỒNG ANH
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: anhpth.ddt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nghiên cứu, thiết kế mô hình hệ thống phân loại sản phẩm ứng dụng công nghệ xử lý ảnh kết hợp cánh tay robot 3 bậc tự do, hướng tới việc tự động hóa khâu nhận diện, phân loại và sắp xếp sản phẩm trong dây chuyền sản xuất quy mô nhỏ. Hệ thống được xây dựng trên nền tảng thư viện xử lý ảnh OpenCV ngôn ngữ Python để xác định tọa độ, hình dạng và kích thước của vật thể trên băng tải; kết hợp với vi điều khiển STM32F103C8T6 để điều khiển cánh tay robot 3 bậc tự do. Kết quả thực nghiệm trên mô hình vật lý cho thấy hệ thống xác định chính xác tọa độ, hình dạng của sản phẩm.

Từ khóa: Xử lý ảnh; OpenCV; cánh tay robot 3 bậc tự do; động học; phân loại sản phẩm.

ABSTRACT

This paper presents the research and design of a product sorting system model utilizing computer vision technology combined with the 3-DOF robotic arm, aiming to automate object identification, classification and arrangement in small-scale production lines. The system is developed using the OpenCV image processing library in Python to determine the coordinates, shape and dimensions of objects on a conveyor belt, integrated with an STM32F103C8T6 microcontroller for controlling the 3-DOF robotic arm. Experimental results on the physical prototype demonstrate that the system accurately identifies product coordinates and shapes.

Keywords: Image processing; OpenCV; 3-DOF robotic arm; kinematics; product sorting.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, với sự phát triển siêu tốc của công nghiệp 4.0, các hệ thống tự động hóa đang dần thay thế lao động thủ công trong nhiều công đoạn sản xuất, đặc biệt là khâu kiểm tra và phân loại sản phẩm [1, 2]. Đây là công đoạn có tính lặp lại cao, đòi hỏi độ chính xác và sự tỉ mỉ mà người lao động khó có thể duy trì ổn định trong thời gian dài, đồng thời ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và uy tín của nhà sản xuất. Vì vậy, việc xây dựng các hệ thống nhận diện và phân loại sản phẩm tự động đã trở thành một yêu cầu tất yếu của sản xuất hiện đại [3].

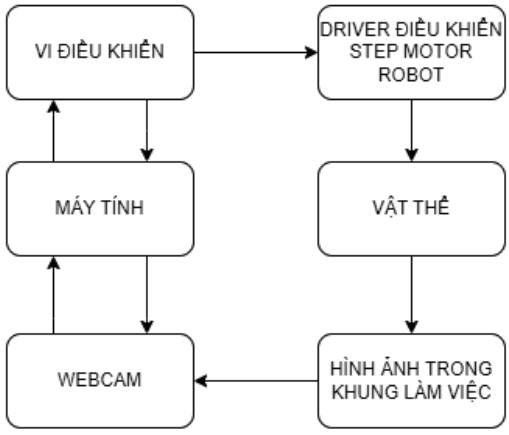
Hiện nay, các phương pháp phân loại sản phẩm phổ biến bao gồm: Phân loại theo kích thước, theo màu sắc [4, 5], theo khối lượng, theo mã vạch/mã QR và theo vật liệu, chất liệu. Trong số đó, giải pháp kết hợp công nghệ xử lý ảnh với cơ cấu chấp hành dạng cánh tay robot được đánh giá là hướng tiếp cận linh hoạt, có khả năng nhận diện đồng thời nhiều đặc trưng của sản phẩm (hình dạng, kích thước, vị trí) mà không cần tiếp xúc trực tiếp, phù hợp với nhiều loại sản phẩm và môi trường sản xuất khác nhau như cơ khí, điện tử, thực phẩm, dược phẩm. Công nghệ xử lý ảnh, với sự hỗ trợ của các thư viện mã nguồn mở như OpenCV, hiện đã được ứng dụng rộng rãi trong y tế, an ninh - giám sát, xe tự hành và giám sát môi trường, cho thấy tính ổn định và độ tin cậy cao khi triển khai trên các nền tảng phần cứng có cấu hình vừa phải [6].

Xuất phát từ nhu cầu thực tế nêu trên, bài báo nghiên cứu thiết kế, chế tạo một mô hình hệ thống phân loại sản phẩm có khả năng: tự nhận biết vị trí, hình dạng và kích thước của sản phẩm bằng công nghệ xử lý ảnh sử dụng thư viện OpenCV; tính toán động học thuận và động học ngược cho cánh tay robot 3 bậc tự do để điều khiển gắp - đặt sản phẩm; xây dựng giao diện điều khiển - giám sát trực quan, hỗ trợ cả chế độ vận hành thủ công và tự động; đảm bảo khả năng truyền - nhận dữ liệu ổn định giữa máy tính và vi điều khiển, đồng thời đếm và hiển thị số lượng sản phẩm đã được phân loại.

2. THIẾT KẾ PHẦN CỨNG HỆ THỐNG

2.1. Sơ đồ khối của hệ thống

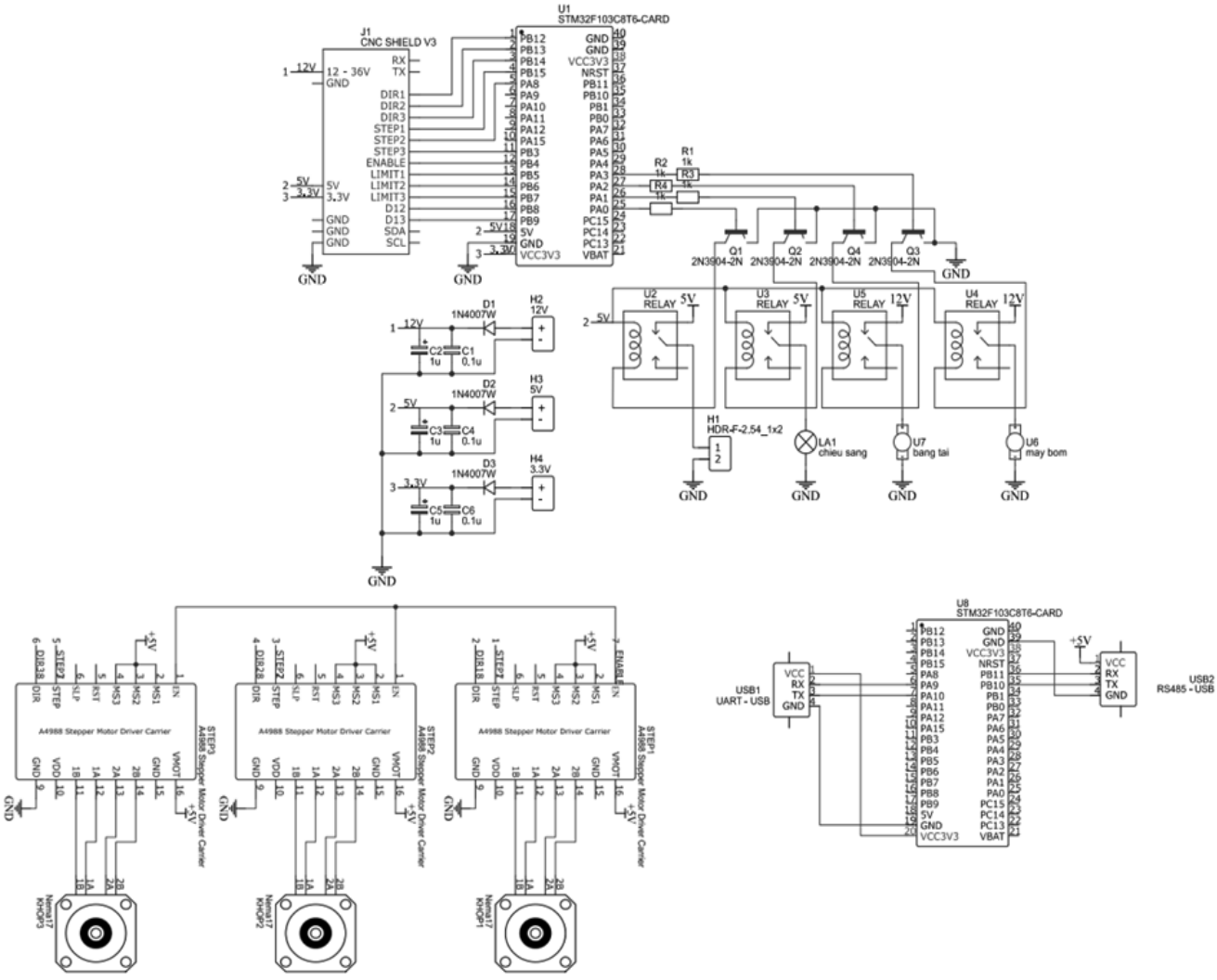
Hệ thống được thể hiện trên Hình 1 gồm các thành phần chính:
- Vật thể (sản phẩm) cần thực hiện công việc;
- Khu vực làm việc là khu vực camera quét và xử lý;
- Camera theo dõi sản phẩm;
- Máy tính xử lý truyền nhận tín hiệu cho vi điều khiển;
- Vi điều khiển thực hiện điều khiển robot và giao tiếp với máy tính.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống

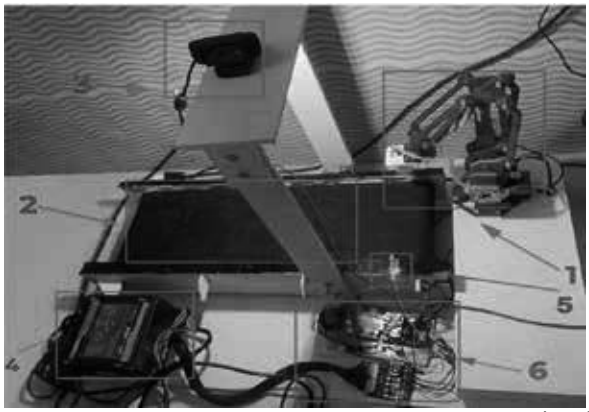
Camera thu nhận hình ảnh vật thể trên khung làm việc gửi về máy tính để xử lý cho ra các dữ liệu, thông số về hình dạng, tọa độ rồi gửi dữ liệu về vi điều khiển. Các động cơ của cánh tay robot chấp hành tín hiệu từ vi điều khiển để tự động nhặt vật thể đúng vị trí đưa vật tới khu vực phân loại.

2.2. Sơ đồ đấu nối



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển trung tâm

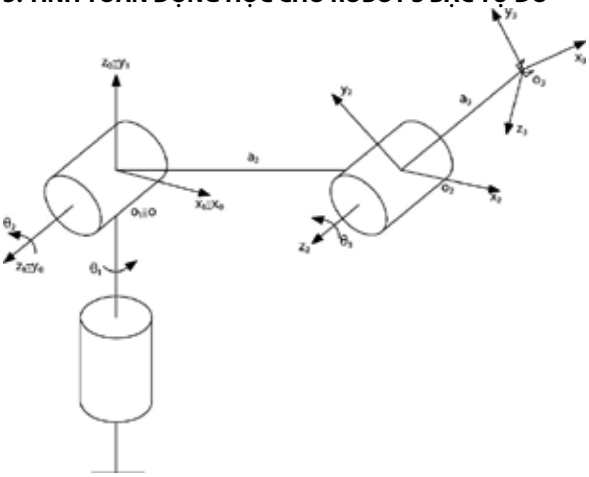
Trong Hình 2, vi điều khiển STM32F103C8T6 đóng vai trò là bộ não trung tâm. Khi nhận được lệnh điều khiển thông qua cổng giao tiếp UART/RS485, vi điều khiển xử lý dữ liệu và xuất tín hiệu điều khiển động cơ bước (qua CNC shield V3) và khối relay đóng cắt điều khiển các thiết bị ngoại vi (đèn, băng tải, máy bơm).



1 - Robot 3 bậc tự do; 2 - Băng tải; 3 - Camera; 4 - Nguồn cấp; 5 - Cảm biến lazer; 6 - Mạch điều khiển

Hình 3. Mô hình phân loại hoàn chỉnh

3. TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC CHO ROBOT 3 BẬC TỰ DO



Hình 4. Đặt khung tọa độ cho mô hình robot 3 bậc tự do

Hệ tọa độ của robot được thiết lập theo phương pháp Denavit-Hartenberg (D-H) cho cơ cấu 3 khớp quay (RRR) trên Hình 4. Ta có Bảng 1 thông số D-H xác định cho mô hình cánh tay 3 bậc tự do như sau:

Bảng 1. Bảng thông số D-H

KTĐ	q_n	θ_n	d_n	a_n	α_n	$s\alpha_n$	$c\alpha_n$
A_1	θ_1	θ_1	0	0	90°	1	0
A_2	θ_2	θ_2	0	a_2	0	0	1
A_3	θ_3	θ_3	0	a_3	0	0	1

Ma trận biến đổi thuần nhất giữa các khớp được biểu diễn như sau:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_2c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_3c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & a_3s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Phương trình động học vị trí: ${}^{R}TH = A1.\ A2.\ A3$

$$= \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & s_1 & c_1(a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_1s_{23} & -s_1s_{23} & -c_1 & s_1(a_2c_2 + a_3c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 1 & a_2s_2 + a_3s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Giải bài toán động ngược, đặt $n_1 = p_x.c_1 + p_y.s_1$; $n_2 = p_z$; ta có giá trị của góc quay của các khớp như sau: $\theta_1 = \text{arctan2}\ (p_y, p_x)$

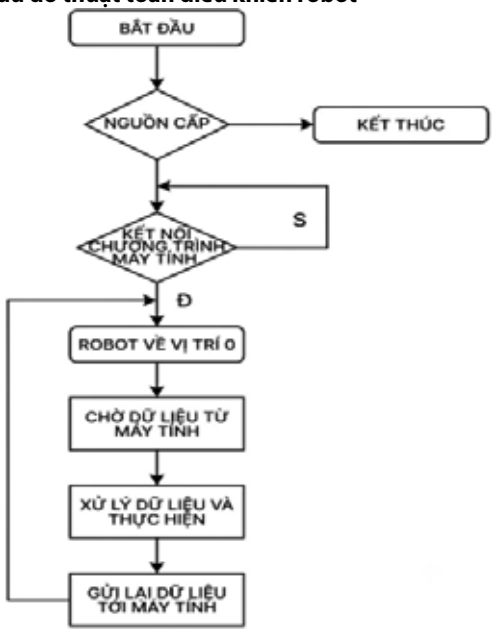
$\theta_1 = arctan2(P_y, P_x)$; $\theta_3 = arctan2(\sqrt{1-c_3^2}, c_3)$ với

$c_3 = \frac{n_1^2+n_2^2-a_2^2-a_3^2}{2a_3s_2}$

$\theta_2 = arctan2(\sqrt{1-c_2^2}, c_2)$ với $c_2 = \frac{n_1.(a_3c_3+a_2)+a_3n_2s_3}{(a_3c_3+a_2)^2+a_3^2s_3^2}$

4. LƯU ĐỒ THUẬT TOÁN

4.1. Lưu đồ thuật toán điều khiển robot



Hình 5. Lưu đồ thuật toán điều khiển robot

Trên Hình 5, khi bắt đầu chương trình, có nguồn cấp, robot chờ tín hiệu kết nối thành công với máy tính, sau đó di chuyển về vị trí 0 để tính toán được góc quay (bước) 1 cách chính xác.

Robot vào trạng thái chờ dữ liệu, khi có dữ liệu điều khiển từ máy tính, thực hiện xử lý dữ liệu và điều khiển robot, robot đạt tới vị trí điều khiển gửi lại máy tính để xác nhận hoàn thành.

4.2. Lưu đồ thuật toán chương trình điều khiển

Chương trình điều khiển chia làm hai chế độ điều khiển được thể hiện trên Hình 6 bao gồm:

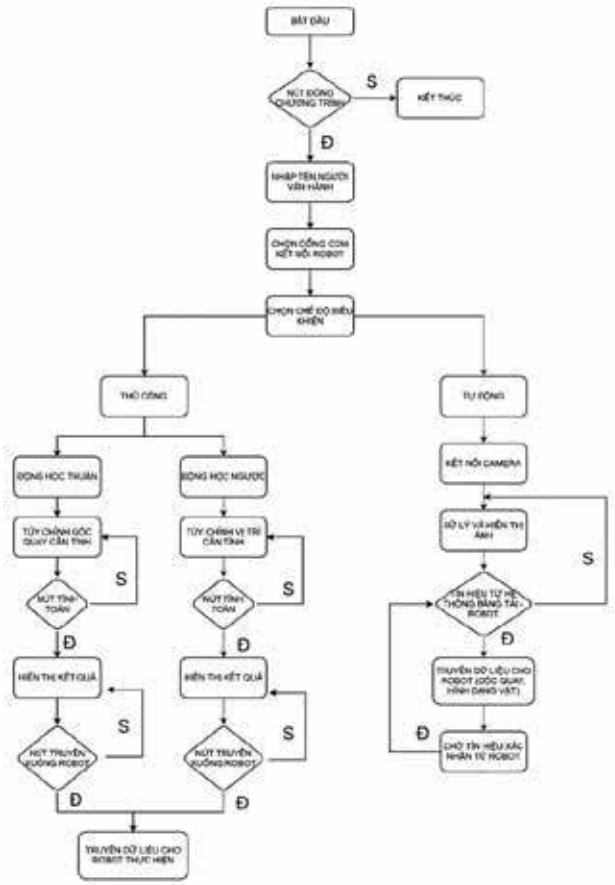
- Chọn cổng kết nối với robot thông qua giao tiếp UART;
- Nút chọn chế độ: tự động hoặc thủ công.

Chọn chế độ thủ công:

- Với động học thuận, kéo thanh giá trị cho góc cần điều khiển, giá trị được hiển thị lên 1 label góc quay tương ứng, sau khi chọn được giá trị điều khiển;
- Bấm nút ấn "Tính toán" để nhận tọa độ đạt được;
- Bấm nút "Điều khiển robot" để thực hiện truyền tín hiệu điều khiển robot .

Chọn chế độ tự động:

- Bấm nút kết nối camera, thực hiện hàm kết nối camera, xử lý ảnh và hiển thị hình ảnh lên khung hiển thị;
- Khi có tín hiệu từ hệ thống cảm biến, truyền dữ liệu điều khiển robot gắp vật có tọa độ gần nhất đưa tới vị trí đặt và truyền dữ liệu hoàn thành cho máy tính;
- Sau khi nhận tín hiệu từ robot, máy tính tiếp tục truyền dữ liệu vật gần nhất tiếp theo tới khi hết vật trong khung làm việc, số lượng vật đã hoàn thành cũng được hiển thị trên giao diện điều khiển.



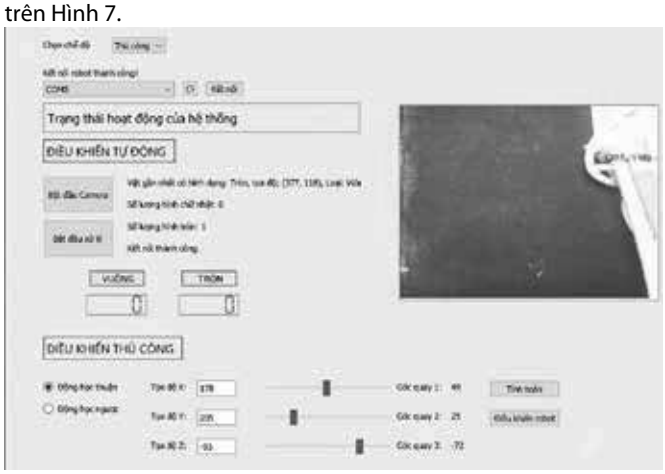
Hình 6. Lưu đồ thuật toán chương trình điều khiển

5. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

5.1. Thực hiện điều khiển robot chế độ thủ công

Tiến hành kiểm tra hoạt động của robot với chương trình điều khiển thủ công, nhập góc quay cho các khớp để kiểm tra robot có đạt được tới vị trí sau tính toán hay không.

Ta tùy chỉnh góc quay bằng thanh kéo tới các góc quay muốn đạt được, bấm tính toán và bấm điều khiển robot theo giao diện trên Hình 7.



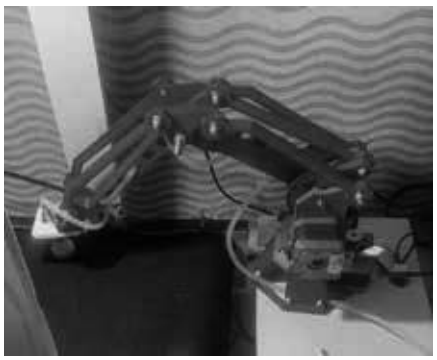
Hình 7. Nhập góc quay tính toán cho robot

Kết quả tính toán:

Góc quay khớp 1 nhập vào là 49, khớp 2 là 25 và khớp 3 là -72

Kết quả tọa độ tính toán được là x = 178, y = 205, z = -93.

Kết quả sau khi nhấn nút điều khiển robot trên Hình 8:



Hình 8. Điều khiển robot chế độ thủ công

Nhận xét: Robot đạt tới vị trí tọa tính toán được. Chuyển động robot mượt, không rung lắc. Hệ thống vi điều khiển và máy tính giao tiếp một cách chính xác.

5.2. Thực hiện điều khiển robot chế độ tự động

Đây là chế độ robot tự nhận diện tọa độ, hình dạng, kích thước của vật để tự động nhặt vật tại đúng vị trí và phân loại chúng.

Hoạt động của hệ thống được thực hiện trên giao diện ở Hình 9.



Hình 9. Thực hiện chế độ điều khiển tự động của robot

Ta chọn chế độ tự động trên tùy chọn chế độ. Nhấn "Bắt đầu camera" để hiển thị camera và sẵn sàng đi vào hoạt động. Sau khi đảm bảo hệ thống robot và máy tính giao tiếp với nhau thì nhấn "Bắt đầu xử lý" để bắt đầu hoạt động của hệ thống. Vi điều khiển nhận chuỗi dữ liệu xử lý và cho băng tải hoạt động.

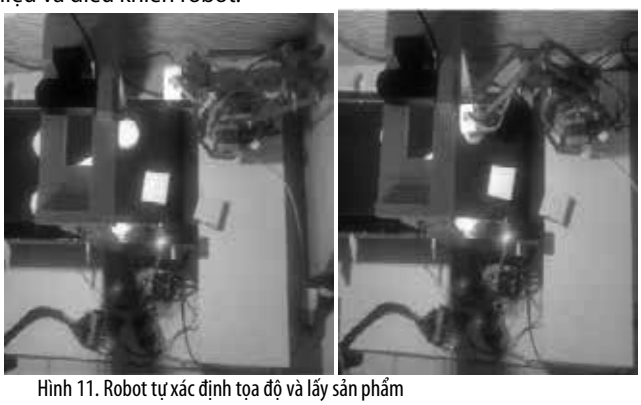
Khi một sản phẩm tới cảm biến lazer, dừng băng tải lập tức và gửi tín hiệu về cho chương trình máy tính, chương trình xử lý ảnh đưa ra tọa độ sản phẩm gần nhất và thực hiện tính toán động học ngược cho robot, sau đó truyền lại dữ liệu để robot thực hiện công tác lấy sản phẩm và phân loại.

Khi sản phẩm vào khung làm việc:



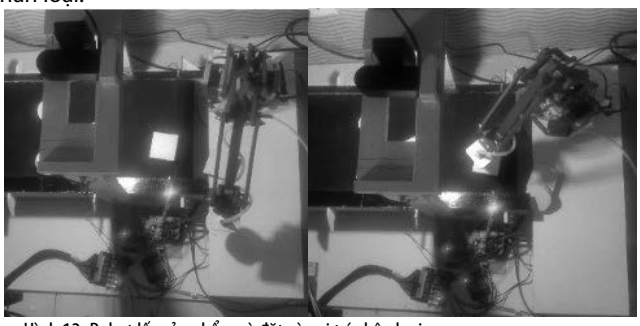
Hình 10. Giao diện hiển thị xác định tọa độ và kích thước của sản phẩm

Sản phẩm chạm tới vị trí kích hoạt cảm biến laser, trao đổi dữ liệu và điều khiển robot:



Hình 11. Robot tự xác định tọa độ và lấy sản phẩm

Robot tự xác định tọa độ của sản phẩm, lấy và đặt vào vị trí phân loại:



Hình 12. Robot lấy sản phẩm và đặt vào vị trí phân loại

Sau khi lấy hết sản phẩm tại khung làm việc, máy tính truyền dữ liệu để tiếp tục hoạt động băng tải và cứ thế lặp lại.



Hình 13. Băng tải hoạt động và đưa sản phẩm tiếp theo khi robot lấy hết sản phẩm trong khung làm việc

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình điều khiển tự động cánh tay robot phân loại sản phẩm theo hình dạng kích thước và tọa độ. Kết quả cho thấy giao tiếp giữa robot và máy tính diễn ra nhanh và chính xác. Thuật toán xử lý ảnh hoạt động ổn định trong thời gian thực, xác định chính xác các thuộc tính của sản phẩm như hình dạng (vuông, tròn), tọa độ trung tâm, diện tích và kích thước vật thể. Từ đó, ứng dụng tiếp cận dần với các các dự án robot trong công nghiệp, góp phần nâng cao chất lượng của lĩnh vực tự động hóa trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Safqut Sanwar, Md. Imteaz Ahmed. Automated Object Sorting System with Real-Time Image Processing and Robotic Gripper Mechanism Control. Journal of Engineering Advancements, vol. 04(03), pp. 70-79,2023, doi: 10.38032/jea.2023.03.003.

[2] Dravid Rajan, Arockia Justin, Dhinakaran, Akash, Amuthan, Fawaz. Development of Vision Based Sorting System Using Machine Learning for Automated Material. International Research Journal on Advanced Engineering Hub, 2025, doi:10.47392/IRJAEH.2025.0651.

[3] Kumar, S. and Prasad, R. Vision-Based Robotic Arm Control for Automated Sorting. Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research, vol. 9, no. 2, pp. 45-52, 2022, doi:10.47392/IRJAEH.2025.0651.

[4] Sulistiyowati I., Ichsan H. M. and Anshory I. Object Sorting Conveyor with Detection Color Using ESP-32 Camera Python Based on Open-CV. JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences), vol. 9, no. 1, pp. 61-68, 2024, doi: 10.54732/jeecs.v9i1.7.

[5] Thịnh, P. T., Quang, Đ. V. Điều khiển và phân loại vật thể dựa trên màu sắc sử dụng cánh tay robot 3 bậc tự do của Fischertechnik. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, 56(1), 11-20, 2020, doi: 10.22144/ctu.jvn.2020.002.

[6] Huỳnh Minh Vũ, Phó Hoàng Linh, Phan Phi Long, Huỳnh Thế Hiển. Robot SCARA dùng trong gắp và đặt. Tạp chí khoa học và công nghệ - Trường Đại học Bình Dương, quyển 6, số 3/2023.

■ Ngày nộp bài: 10/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 19/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 06/11/2026

Điều khiển chuyển động tàu mặt nước tự hành dưới nhiễu môi trường: Tổng quan và xu hướng điều khiển lai

Motion control of unmanned surface vehicles under environmental disturbances: A review and hybrid control trends

> THS.NCS LÊ THÀNH TIỄN[1,*], PGS.TS NGUYỄN ĐÌNH THẠCH[2],TS PHẠM NAM THANH[1]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
[2]Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[*]Email: tienlt@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Tàu mặt nước tự hành (Unmanned Surface Vehicle - USV) ngày càng được ứng dụng trong khảo sát, tìm kiếm cứu nạn và các nhiệm vụ hàng hải khác. Tuy nhiên, điều khiển chuyển động USV vẫn gặp nhiều thách thức do động lực học phi tuyến, bất định mô hình và tác động của môi trường như gió, sóng, dòng chảy. Bài báo trình bày tổng quan 4 nhóm phương pháp điều khiển chuyển động USV, gồm điều khiển cổ điển và thích nghi, điều khiển phi tuyến và bền vững, điều khiển dự báo mô hình, cùng điều khiển dựa trên dữ liệu và học tăng cường. Các phương pháp được đánh giá theo khả năng chống nhiễu, xử lý ràng buộc, khả năng thích nghi, yêu cầu tính toán và mức độ kiểm chứng thực nghiệm. Kết quả tổng hợp cho thấy MPC có ưu thế trong xử lý hệ đa biến và các ràng buộc, trong khi DRL có khả năng thích nghi nhưng còn phụ thuộc mạnh vào dữ liệu huấn luyện, khả năng tổng quát hóa và bảo đảm an toàn. Trên cơ sở đó, bài báo phân tích xu hướng kết hợp mô hình vật lý, MPC, ước lượng trạng thái/nhiễu và các thành phần học trong kiến trúc điều khiển lai.

Từ khóa: Tàu mặt nước tự hành; USV; điều khiển chuyển động; mô hình điều khiển dự báo; học tăng cường sâu; điều khiển lai.

ABSTRACT

Unmanned Surface Vehicles (USVs) are increasingly employed in surveying, search and rescue and other maritime missions. However, USV motion control remains challenging due to nonlinear dynamics, model uncertainties and environmental disturbances such as wind, waves and currents. This paper reviews four major groups of USV motion control methods: Classical and adaptive control, nonlinear and robust control, model predictive control and data-driven and reinforcement-learning-based control. The reviewed approaches are evaluated in terms of disturbance rejection, constraint handling, adaptability, computational requirements and the level of experimental validation. The synthesis indicates that Model Predictive Control (MPC) offers clear advantages in handling multivariable systems and system constraints, whereas Deep Reinforcement Learning (DRL) provides strong adaptive capability but remains highly dependent on training data, generalization performance and safety assurance. Based on these observations, the paper further discusses emerging hybrid control architectures that integrate physical models, MPC, state/disturbance estimation and learning-based components to improve the robustness and adaptability of USV motion control under uncertain and time-varying maritime environments.

Keywords: Unmanned surface vehicle; motion control; model predictive control; deep reinforcement learning; hybrid control.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tàu mặt nước tự hành là một trong những phương tiện phục vụ khảo sát, kiểm tra các khu vực, công trình cảng. USV có khả năng thực hiện các nhiệm vụ kéo dài hoặc hoạt động trong những khu vực nguy hiểm mà không đặt con người trực tiếp vào môi trường rủi ro. Tuy nhiên, để thực hiện các nhiệm vụ này một cách độc lập, USV phải có khả năng duy trì hướng, bám đường đi hoặc bám quỹ đạo với độ chính xác cao trong môi trường thay đổi [1, 2].

Chuyển động của USV chịu ảnh hưởng trực tiếp của các lực thủy động và nhiễu môi trường. Mô hình chuyển động thường có tính phi tuyến và chứa nhiều tham số khó nhận dạng chính xác. Đồng thời, gió, sóng và dòng chảy tạo ra các tác động thay đổi theo thời gian và không thể được biểu diễn hoàn toàn bởi một mô hình xác định duy nhất. Các nghiên cứu thực nghiệm cũng cho thấy thay đổi tải trọng, đặc tính cơ cấu chấp hành và điều kiện vận hành có thể làm thay đổi đáp ứng của tàu [2, 8]. Các hướng tiếp cận SMC thích nghi cũng được nghiên cứu nhằm tăng khả năng chống nhiễu và giảm hiện tượng chattering [4].

Từ những vấn đề trên, bài báo tập trung trả lời 3 câu hỏi: (i) Các nhóm phương pháp hiện nay xử lý nhiễu môi trường và bất định mô hình ở mức nào?; (ii) Kết quả đã được kiểm chứng đến đâu, từ mô phỏng đến thử nghiệm tàu thật?; (iii) Xu hướng nào có khả năng kết hợp được tính tin cậy của mô hình vật lý với khả năng thích nghi của phương pháp học.

Nội dung bài báo được chia thành các phần sau: Mục 2 trình bày mô hình động học, động lực học 3-DOF của USV và các thách thức điều khiển dưới tác động của gió, sóng, dòng chảy và bất định hệ thống. Mục 3 tổng quan các nhóm phương pháp điều khiển chuyển động USV, bao gồm điều khiển cổ điển và thích nghi, điều khiển phi tuyến và bền vững, điều khiển dự báo mô hình, cùng các phương pháp dựa trên dữ liệu và học tăng cường. Mục 4 thực hiện đánh giá so sánh các phương pháp, xác định các khoảng trống nghiên cứu và phân tích xu hướng phát triển các kiến trúc điều khiển lai model-learning. Cuối cùng, các kết luận và kiến nghị cho hướng nghiên cứu tiếp theo được trình bày trong Mục 5.

2. MÔ HÌNH CHUYỂN ĐỘNG VÀ CÁC THÁCH THỨC ĐIỀU KHIỂN USV

2.1. Mô hình động học và động lực học USV

Chuyển động của USV có tính phi tuyến, chịu ảnh hưởng của lực thủy động và nhiễu môi trường. Trong các bài toán điều khiển hướng, bám đường và bám quỹ đạo, mô hình 3-DOF trên mặt phẳng ngang gồm surge, sway và yaw được sử dụng phổ biến [1, 2]. Trạng thái vị trí và hướng của USV trong hệ tọa độ cố định với trái đất được biểu diễn bởi vector:

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad \psi]^T \tag{1}$$

Trong đó: x và y lần lượt là tọa độ vị trí của tàu trên mặt phẳng ngang, còn ψ là góc hướng của tàu.

Vector vận tốc trong hệ tọa độ gắn với thân USV được xác định:

$$\boldsymbol{\nu} = [u \quad v \quad r]^T \tag{2}$$

Trong đó: u là vận tốc dọc tàu (surge velocity), v là vận tốc ngang tàu (sway velocity) và r là vận tốc góc quay quanh trục đứng (yaw rate).

Quan hệ giữa vận tốc trong hệ tọa độ thân tàu và chuyển động trong hệ tọa độ toàn cục được biểu diễn bởi phương trình động học [1]:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{R}(\psi)\boldsymbol{\nu} \tag{3}$$

Trong đó: Ma trận chuyển đổi tọa độ được xác định:

$$\boldsymbol{R}(\psi) = \begin{bmatrix} cos\,\psi & -sin\,\psi & 0 \\ sin\,\psi & cos\,\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Ma trận $\boldsymbol{R}(\psi)$ thực hiện phép biến đổi giữa vận tốc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu và tốc độ thay đổi vị trí, hướng trong hệ tọa độ toàn cục. Theo mô hình động lực học tàu của Fossen [1], phương trình chuyển động tổng quát của USV trong mặt phẳng ngang có thể viết dưới dạng:

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{env} \tag{5}$$

Trong đó: $\boldsymbol{M}$ là ma trận quán tính tổng hợp, bao gồm khối lượng và mô-men quán tính của tàu cùng các thành phần added mass; $(\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\nu}))$ biểu diễn các thành phần Coriolis và hướng tâm; $(\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu}))$ đặc trưng cho lực cản thủy động; $(\boldsymbol{\tau})$ là vector lực và mô men sinh ra bởi cơ cấu chấp hành; và $(\boldsymbol{\tau}_{env})$ biểu diễn các tác động từ môi trường [1].

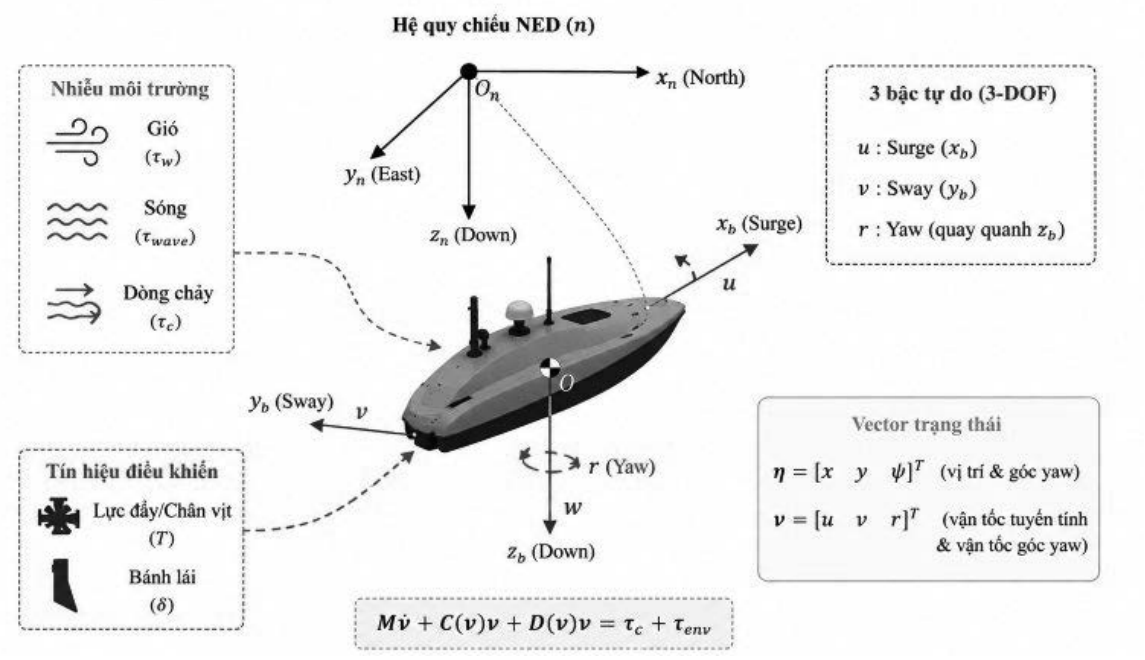
2.2. Ảnh hưởng của nhiễu môi trường

Đối với mô hình định hướng điều khiển, tác động tổng hợp của môi trường thường được biểu diễn thông qua một vector lực và mô men nhiễu tương đương:

$$\boldsymbol{\tau}_{env} = \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} + \boldsymbol{\tau}_{current} \tag{6}$$

Trong đó: $(\boldsymbol{\tau}_{wind})$ biểu diễn lực và mô-men khí động do gió; $(\boldsymbol{\tau}_{wave})$ mô tả ảnh hưởng của sóng; còn $(\boldsymbol{\tau}_{current})$ phản ánh tác động của dòng chảy.

Hình 1 minh họa mối quan hệ giữa gió, sóng, dòng chảy, động lực học USV và vòng điều khiển chuyển động.



Hình 1. Khung tọa độ và mô hình chuyển động 3-DOF của USV dưới tác động của môi trường [1]

2.3. Các thách thức đối với điều khiển chuyển động USV

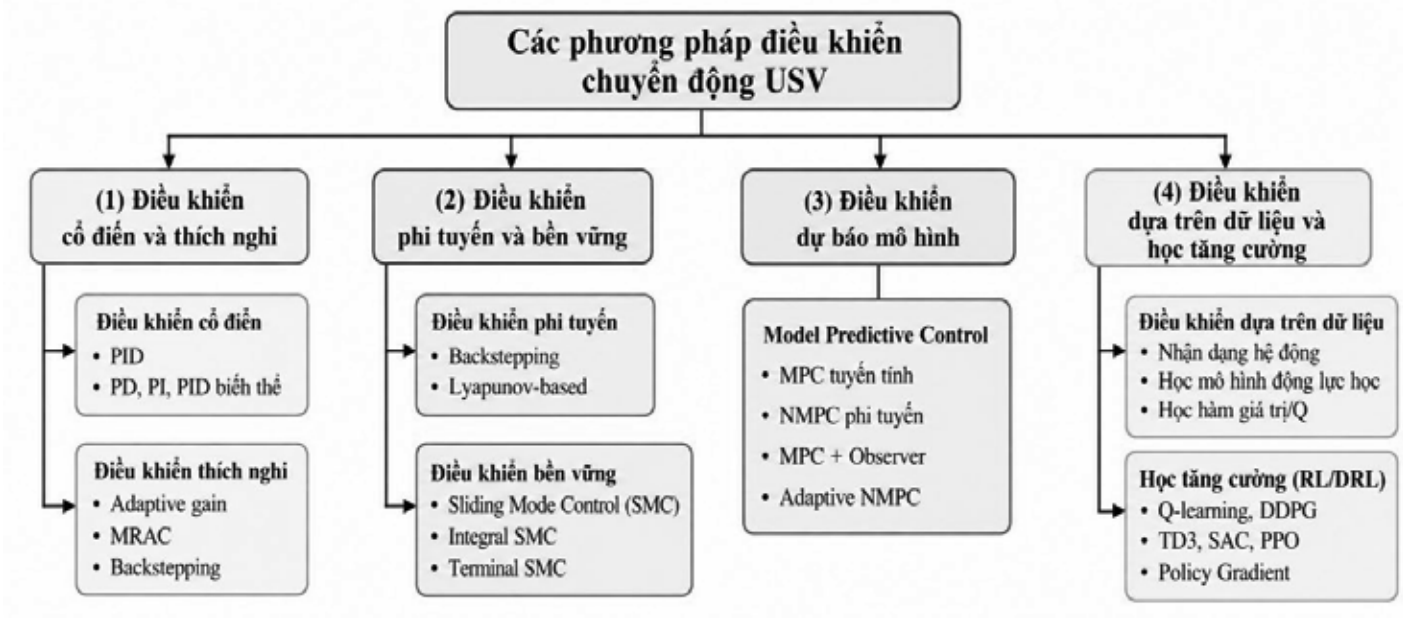
Điều khiển chuyển động USV chịu ảnh hưởng của tính phi tuyến, bất định mô hình, nhiễu môi trường và giới hạn cơ cấu chấp hành. Đồng thời, gió, sóng và dòng chảy biến thiên theo thời gian làm tăng yêu cầu về khả năng bù nhiễu và tính bền vững [6, 8, 16]. Ngoài ra, bánh lái, chân vịt và bộ đẩy đều bị giới hạn về biên độ và tốc độ đáp ứng, do đó cần được xét trực tiếp trong thiết kế điều khiển. Ràng buộc đầu vào có thể biểu diễn tổng quát:

$$\boldsymbol{\tau}_{min} \leq \boldsymbol{\tau}(t) \leq \boldsymbol{\tau}_{max} \quad (7)$$

Ngoài ra, đánh giá bộ điều khiển cần xét đồng thời độ chính xác bám, khả năng chống nhiễu và tính khả thi thời gian thực.

3. TỔNG QUAN CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG USV

Phương pháp điều khiển có thể phân thành 4 nhóm chính gồm: Điều khiển truyền thống và thích nghi, điều khiển phi tuyến-bền vững, điều khiển dự báo mô hình và điều khiển dựa trên dữ liệu học tăng cường. Sự phát triển của các phương pháp này được minh họa trong Hình 2.



Hình 2. Phân loại các phương pháp điều khiển chuyển động cho USV

3.1. Điều khiển truyền thống và thích nghi

Điều khiển thích nghi cho phép cập nhật tham số hoặc tín hiệu bù trong quá trình vận hành; Liu và cộng sự [2] đã chứng minh hiệu quả của hướng tiếp cận này khi xét đồng thời gió, sóng, dòng chảy và giới hạn bánh lái trong bài toán bám đường USV. PID vẫn được sử dụng rộng rãi trong điều khiển hướng và tốc độ USV. Luật điều khiển PID được biểu diễn [2]:

$$u_c(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \dot{e}(t) \quad (8)$$

Trong đó: $e(t)$ là sai lệch điều khiển; K_p, K_i, K_d lần lượt là các hệ số tỷ lệ, tích phân và vi phân.

3.2. Điều khiển phi tuyến và bền vững

Các phương pháp backstepping và SMC được nghiên cứu rộng rãi nhằm xử lý tính phi tuyến và bất định của USV. Backstepping xây dựng luật điều khiển theo từng bước dựa trên cấu trúc động lực học của hệ [3, 4].

SMC đặc biệt phù hợp khi hệ chịu nhiễu bị chặn. Với một sai lệch điều khiển (e), mặt trượt có thể được xác định ở dạng đơn giản:

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t), \qquad \lambda > 0 \quad (9)$$

Luật điều khiển được thiết kế để đưa ($s(t)$) về gần bằng không và duy trì trạng thái trên mặt trượt.

3.3. Điều khiển dự báo mô hình

MPC sử dụng mô hình của hệ để dự báo trạng thái trong một khoảng thời gian hữu hạn và xác định tín hiệu điều khiển thông qua bài toán tối ưu. Một hàm mục tiêu điển hình có dạng:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \boldsymbol{e}_{k+i|k}^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{e}_{k+i|k} + \sum_{i=0}^{N_c-1} \Delta \boldsymbol{u}_{k+i|k}^T \boldsymbol{R} \Delta \boldsymbol{u}_{k+i|k} \quad (10)$$

Trong đó: N_p là số bước dự báo, N_c là số bước điều khiển được tối ưu; $\boldsymbol{Q}$ là ma trận trọng số xác định mức độ ưu tiên giảm sai lệch bám, trong khi $\boldsymbol{R}$ là ma trận trọng số dùng để hạn chế sự biến thiên của tín hiệu điều khiển [6, 8]. $\boldsymbol{e}_{k+i|k}$ sai lệch dự báo tại thời điểm *k+i*, dựa trên thông tin tại *k*; $\Delta \boldsymbol{u}_{k+i|k}$: Độ biến thiên tín hiệu điều khiển.

3.4. Điều khiển dựa trên dữ liệu và học tăng cường

Các phương pháp dựa trên dữ liệu hướng tới giảm sự phụ thuộc vào mô hình vật lý bằng cách học trực tiếp động lực học hoặc chính sách điều khiển từ dữ liệu. Trong Reinforcement Learning (RL), tác nhân lựa chọn hành động (a_t) dựa trên trạng thái (s_t) và nhận phần thưởng (r_t) từ môi trường. Wang và cộng sự [16] huấn luyện DRL trong mô phỏng nhưng đánh giá trực tiếp trong môi trường nước tự nhiên và so sánh với điều khiển dự báo mô hình phi tuyến (NMPC) cho thấy tiềm năng chống nhiễu của chính sách học khi chuyển sang hệ thống thực.

4. ĐÁNH GIÁ, KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU VÀ XU HƯỚNG ĐIỀU KHIỂN LAI

4.1. Đánh giá các phương pháp điều khiển

Các phương pháp trình bày trong Mục 3 có những ưu điểm và hạn chế khác nhau khi áp dụng cho USV chịu tác động của nhiễu môi trường. Vì vậy, việc đánh giá không nên chỉ dựa trên sai số bám mà cần đồng thời xem xét khả năng xử lý bất định, ràng buộc, tính ổn định, khả năng thích nghi, yêu cầu tính toán và mức độ kiểm chứng thực nghiệm.

Bảng 1. So sánh các nhóm phương pháp điều khiển chuyển động USV

Phương pháp	Phụ thuộc mô hình	Khả năng chống nhiễu	Xử lý ràng buộc	Khả năng thích nghi	Chi phí tính toán	Mức độ triển khai thực tế
PID	Thấp	Trung bình	Hạn chế	Thấp	Rất thấp	Cao
Adaptive/Backstepping	Cao	Khá	Hạn chế	Cao	Trung bình	Khá
SMC	Trung bình	Cao	Hạn chế	Trung bình-cao	Thấp-trung bình	Khá
MPC/NMPC	Cao	Cao	Rất tốt	Trung bình	Cao	Khá-cao
DRL	Thấp-trung bình*	Cao*	Có thể tích hợp	Cao	Cao	Trung bình
Hybrid MPC-DRL	Trung bình	Cao	Tốt-rất tốt	Cao	Cao	Rất cao

DRL có khả năng thích nghi cao nhưng còn phụ thuộc vào quá trình huấn luyện, tính tổng quát và mức độ bảo đảm an toàn. Do đó, các kiến trúc lai MPC-DRL đang trở thành hướng tiềm năng nhằm kết hợp khả năng xử lý ràng buộc của MPC với khả năng thích nghi của phương pháp học [14, 17].

Bảng 2. Tổng hợp một số nghiên cứu tiêu biểu về điều khiển chuyển động USV

Tài liệu	Phương pháp	Nhiễu/bất định chính	Kiểm chứng	Hạn chế chính
Liu và cs. [2]	Adaptive control	Gió, sóng, dòng chảy	USV thực	Phụ thuộc mô hình
Fu và cs. [6]	MPC + NDO	Nhiễu môi trường	Mô phỏng	Chưa kiểm chứng thực
Wang và cs. [8]	Adaptive NMPC	Thay đổi tải trọng	Thực nghiệm	Chi phí tính toán cao
Wang và cs. [16]	DRL	Gió, sóng, dòng chảy	Vùng nước tự nhiên	Khả năng tổng quát hóa
Martinsen và cs. [17]	RL/SYSID-enhanced NMPC	Sai lệch mô hình, nhiễu	Sea trial	Cấu trúc phức tạp

Bảng 2 cho thấy các phương pháp điều khiển USV đang chuyển dần từ điều khiển dựa trên mô hình sang các cấu trúc thích nghi và lai model - learning.

4.2. Khoảng trống nghiên cứu

Từ các công trình đã tổng hợp, có thể nhận thấy một số khoảng trống chính trong điều khiển chuyển động USV.

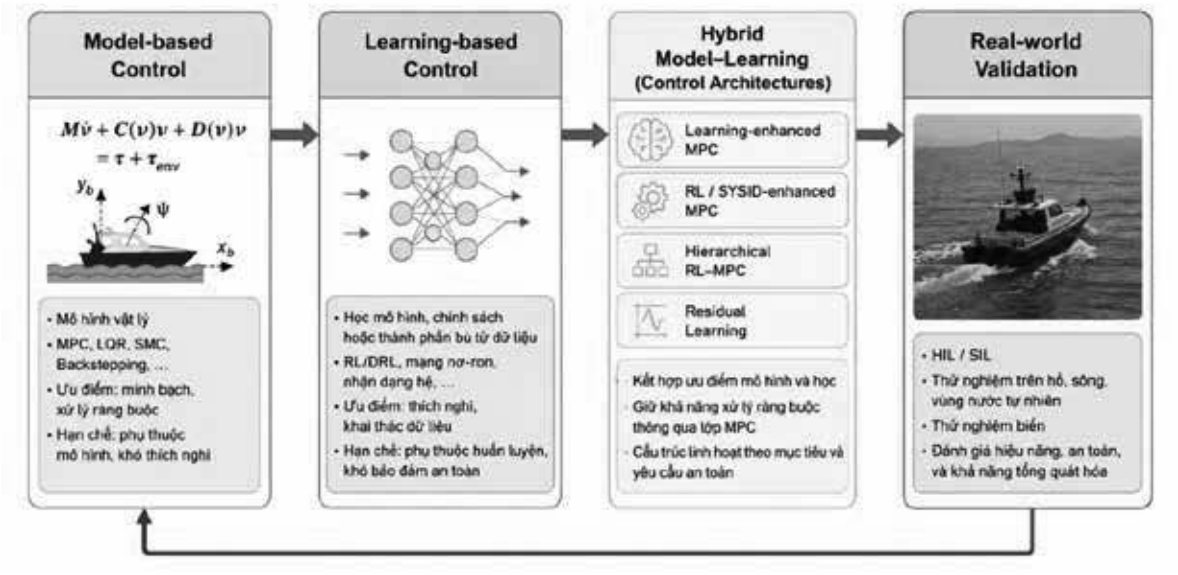
Thứ nhất, mô hình nhiễu môi trường còn đơn giản hóa. Nhiều nghiên cứu biểu diễn gió, sóng và dòng chảy dưới dạng nhiễu xác định hoặc bị chặn, trong khi môi trường biển thực tế có tính ngẫu nhiên và biến thiên mạnh theo thời gian [4, 6].

Thứ hai, khoảng cách giữa mô phỏng và hệ thống thực vẫn còn đáng kể. Khi triển khai trên USV thực, sai số mô hình, nhiễu cảm biến, độ trễ và giới hạn cơ cấu chấp hành có thể làm suy giảm hiệu năng. Do đó, cần tăng cường quá trình kiểm chứng từ mô phỏng, HIL đến thử nghiệm trên USV thực [16, 17].

Thứ ba, DRL còn hạn chế về bảo đảm an toàn, ổn định và khả năng tổng quát hóa. Một chính sách được huấn luyện trên một mô hình hoặc điều kiện môi trường cụ thể chưa chắc duy trì hiệu quả khi tải trọng, động lực học hoặc trạng thái biển thay đổi [18].

4.3. Xu hướng điều khiển lai model - learning

Một cấu trúc khác là residual learning, trong đó thành phần học chỉ tạo tín hiệu bù cho bộ điều khiển dựa trên mô hình. Do đó, điều khiển lai model-learning không nên được đồng nhất với phép cộng trực tiếp giữa tín hiệu MPC và tín hiệu RL; cấu trúc tích hợp cụ thể phụ thuộc vào mục tiêu điều khiển, dạng mô hình và yêu cầu bảo đảm an toàn của hệ thống. Hình 3 minh họa lộ trình này từ các phương pháp điều khiển dựa trên mô hình đến các kiến trúc học và cuối cùng là điều khiển lai hướng tới triển khai USV thực.



Hình 3. Xu hướng phát triển từ điều khiển dựa trên mô hình và dữ liệu đến các kiến trúc điều khiển lai model-learning cho USV

Một hướng nghiên cứu có triển vọng là kết hợp mô hình vật lý, ước lượng trạng thái/nhiễu, MPC và các thành phần học thay vì thay thế hoàn toàn bộ điều khiển dựa trên mô hình bằng một chính sách học đầu-cuối.

5. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Bài báo đã tổng quan các nhóm phương pháp điều khiển chuyển động USV dưới tác động của nhiễu môi trường, bất định mô hình và ràng buộc cơ cấu chấp hành. PID có ưu điểm về cấu trúc đơn giản và khả năng triển khai, trong khi các phương pháp thích nghi, backstepping và SMC nâng cao khả năng xử lý bất định và nhiễu. MPC/NMPC nổi bật nhờ khả năng dự báo và xử lý trực tiếp các ràng buộc, nhưng yêu cầu mô hình và tài nguyên tính toán cao. Các phương pháp RL/DRL có tiềm năng thích nghi song còn phụ thuộc vào quá trình huấn luyện, khả năng tổng quát hóa và yêu cầu bảo đảm an toàn. Tuy nhiên, lợi ích của cấu trúc lai cần được đánh giá cùng với tính ổn định, an toàn, chi phí tính toán và khả năng triển khai thời gian thực. Các nghiên cứu tiếp theo cần tăng cường kiểm chứng HIL và thử nghiệm USV thực trong các điều kiện gió, sóng, dòng chảy và tải trọng thay đổi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] T. I. Fossen. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., 2021, doi: 10.1002/9781119575016.

[2] Z. Liu, Y. Zhang, C. Yuan, J. Luo. Adaptive Path Following Control of Unmanned Surface Vehicles Considering Environmental Disturbances and System Constraints. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 1, pp. 339-353, 2021, doi: 10.1109/TSMC.2018.2871672.

[3] Y. Weng, N. Wang. Data-Driven Robust Backstepping Control of Unmanned Surface Vehicles. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 30, no. 9, pp. 3624-3638, 2020, doi: 10.1002/rnc.4956.

[4] A. Gonzalez-Garcia, H. Castañeda-Cuevas. Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Control for an Unmanned Surface Vehicle Against External Disturbances. IFAC-PapersOnLine, vol. 54, no. 16, pp. 202-207, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.094.

[5] H. Cao, R. Xu, S. Zhao, M. Li, X. Song, H. Dai. Robust Trajectory Tracking for Fully-Input-Bounded Actuated Unmanned Surface Vessel with Stochastic Disturbances: An Approach by the Homogeneous Nonlinear Extended State Observer and Dynamic Surface Control. Ocean Engineering, vol. 243, article no. 110113, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110113.

[6] H. Fu, W. Yao, R. Cajo, S. Zhao. Trajectory Tracking Predictive Control for Unmanned Surface Vehicles with Improved Nonlinear Disturbance Observer. Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11, no. 10, article no. 1874, 2023, doi: 10.3390/jmse11101874.

[7] Y. Ma, Z. Liu, T. Wang, S. Song, J. Xiang, X. Zhang. Multi-Model Predictive Control Strategy for Path-Following of Unmanned Surface Vehicles in Wide-Range Speed Variations. Ocean Engineering, vol. 295, article no. 116845, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.116845.

[8] W. Wang, N. Hagemann, C. Ratti, D. Rus. Adaptive Nonlinear Model Predictive Control for Autonomous Surface Vessels with Largely Varying Payload. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 7337-7343, 2021, doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561331.

[9] W. Wang, W. Xiao, A. Gonzalez-Garcia, J. Swevers, C. Ratti, D. Rus. Robust Model Predictive Control with Control Barrier Functions for Autonomous Surface Vessels. Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6089-6095, 2024, doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10610620.

[10] J. Woo, C. Yu, N. Kim. Deep Reinforcement Learning-Based Controller for Path Following of an Unmanned Surface Vehicle. Ocean Engineering, vol. 183, pp. 155-166, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.099.

[11] E. Meyer, H. Robinson, A. Rasheed, O. San. Taming an Autonomous Surface Vehicle for Path Following and Collision Avoidance Using Deep Reinforcement Learning. IEEE Access, vol. 8, pp. 41466-41481, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2976586.

[12] A. Gonzalez-Garcia, D. Barragan-Alcantar, I. Collado-Gonzalez, L. Garrido. Adaptive Dynamic Programming and Deep Reinforcement Learning for the Control of an Unmanned Surface Vehicle: Experimental Results. Control Engineering Practice, vol. 111, article no. 104807, 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104807.

[13] N. Wang, Y. Gao, X. Zhang. Data-Driven Performance-Prescribed Reinforcement Learning Control of an Unmanned Surface Vehicle. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 32, no. 12, pp. 5456-5467, 2021, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3056444.

[14] Y. Cui, L. Peng, H. Li. Filtered Probabilistic Model Predictive Control-Based Reinforcement Learning for Unmanned Surface Vehicles. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 10, pp. 6950-6961, 2022, doi: 10.1109/TII.2022.3142323.

[15] Z. Peng, E. Liu, C. Pan, H. Wang, D. Wang, L. Liu. Model-Based Deep Reinforcement Learning for Data-Driven Motion Control of an Under-Actuated Unmanned Surface Vehicle: Path Following and Trajectory Tracking. Journal of the Franklin Institute, vol. 360, no. 6, pp. 4399-4426, 2023, doi: 10.1016/j.jfranklin.2022.10.020.

[16] W. Wang, X. Cao, A. Gonzalez-Garcia, L. Yin, N. Hagemann, Y. Qiao, C. Ratti, D. Rus. Deep Reinforcement Learning Based Tracking Control of an Autonomous Surface Vessel in Natural Waters. Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3109-3115, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160858.

[17] A. B. Martinsen, A. M. Lekkas, S. Gros. Reinforcement Learning-Based NMPC for Tracking Control of ASVs: Theory and Experiments. Control Engineering Practice, vol. 120, article no. 105024, 2022, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.105024.

[18] K. Jin, H. Zhu, R. Gao, J. Wang, H. Wang, H. Yi, C.-J. R. Shi. DEMRL: Dynamic Estimation Meta Reinforcement Learning for Path Following on Unseen Unmanned Surface Vehicle. Ocean Engineering, vol. 288, article no. 115958, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115958.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/10/2026

Nghiên cứu khôi phục biên dạng bề mặt bằng kính hiển vi số digital holographic ngoài trục phản xạ

Research on surface profile reconstruction using an off-axis reflective digital holographic microscope

> TS LÊ KIM THƯ
Học viện Kỹ thuật Quân sự
*Email: Thulk@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp mô phỏng và khôi phục biên dạng bề mặt quang học dạng cầu dựa trên kỹ thuật hologram kỹ thuật số ngoài trục. Ảnh hologram thu nhận từ hệ thống giao thoa được chuyển sang miền tần số không gian bằng phép biến đổi Fourier để phân tích cấu trúc phổ. Nhằm cô lập tối ưu thành phần tín hiệu hữu ích, một phin lọc không gian được thiết lập dựa trên kích thước và thông số thực tế của vật kính hiển vi quang học. Từ phổ tần số đã lọc, dữ liệu pha ban đầu được trích xuất nhưng vẫn ở dạng gián đoạn do đặc tính tuần hoàn của hàm lượng giác. Thuật toán mở pha sau đó được áp dụng để khôi phục trường pha liên tục, từ đó chuyển đổi chính xác sang chiều cao biên dạng bề mặt vật thể. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng khôi phục biên dạng bề mặt với độ chính xác cao, qua đó khẳng định tiềm năng ứng dụng trong đo lường bề mặt quang học chính xác.

Từ khóa: Kính hiển vi holographic số; cấu trúc tế vi; khôi phục biên dạng.

ABSTRACT

This paper presents a simulation-based method for reconstructing spherical optical surface profiles using off-axis digital holography. The hologram recorded by the interferometric system is transformed into the spatial frequency domain using the Fourier transform to analyze its spectral structure. To optimally isolate the useful signal component, a spatial filter is designed based on the dimensions and actual specifications of the optical microscope objective. The initial phase distribution is extracted from the filtered frequency spectrum; however, it remains discontinuous due to the periodic nature of trigonometric functions. A phase unwrapping algorithm is then applied to recover the continuous phase distribution, which is subsequently converted into the surface height profile of the object. The reconstruction results demonstrate high accuracy, confirming the effectiveness and practical applicability of the proposed method for precision optical surface metrology.

Keywords: Digital holographic microscopy; microstructure; surface profile reconstruction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đo lường biên dạng bề mặt ở thang vi mô là một nhiệm vụ quan trọng trong kiểm tra chất lượng và đặc trưng hóa hình học của các linh kiện cơ khí chính xác, vi cấu trúc, linh kiện bán dẫn, hệ vi cơ điện tử (MEMS) và các lớp phủ chức năng. Các thông số như chiều cao bậc, độ nhám, độ cong và sai lệch hình dạng có ảnh hưởng trực tiếp đến đặc tính vận hành và độ tin cậy của sản phẩm. Mặc dù các phương pháp đo tiếp xúc, điển hình là phương pháp đầu dò cơ học, có khả năng xác định biên dạng với độ chính xác cao trong nhiều điều kiện đo, chúng vẫn tồn tại những hạn chế nhất định khi khảo sát các cấu trúc có kích thước nhỏ, bề mặt dễ biến dạng hoặc các mẫu cần đo trên diện tích lớn với thời gian ngắn. Do đó, các phương pháp đo lường quang học không tiếp xúc, có khả năng thu nhận thông tin hình học trên toàn trường đo, ngày càng được quan tâm trong lĩnh vực đo lường và kiểm tra chất lượng bề mặt (Kemper and von Bally, 2008; Paturzo et al., 2018; Hernández-Montes et al., 2020; Kim, 2022).

Trong số các phương pháp đo quang học, kính hiển vi holographic số (digital holographic microscopy, DHM) nổi bật nhờ khả năng tái tạo trường quang học phức từ hologram được ghi trực tiếp bằng cảm biến ảnh. Khác với phương pháp tạo ảnh thông thường chủ yếu ghi nhận phân bố cường độ sáng, DHM cho phép xác định đồng thời biên độ và pha của trường quang

học thông qua quá trình tái tạo số (Schnars and Jüptner, 1994, 2005). Bản đồ pha định lượng thu được có thể được sử dụng để xác định sự khác biệt về quang lộ, từ đó suy ra các đặc trưng hình học của mẫu trong những điều kiện đo thích hợp. Khả năng tái tạo số, điều chỉnh mặt phẳng lấy nét bằng tính toán và xử lý dữ liệu toàn trường khiến DHM trở thành một công cụ tiềm năng cho đo lường bề mặt vi mô và đặc trưng hóa các cấu trúc quang học (Kemper and von Bally, 2008; Paturzo et al., 2018; Kim, 2022; Balasubramani et al., 2021).

Đối với các mẫu có tính phản xạ, DHM phản xạ cho phép khai thác sự biến thiên pha của ánh sáng phản xạ để khôi phục biên dạng bề mặt. Khi bề mặt dịch chuyển theo phương pháp tuyến, quang lộ của ánh sáng phản xạ thay đổi, tạo ra sự biến thiên pha có quan hệ với độ cao bề mặt. Đối với góc chiếu khác vuông góc, cần xét thành phần hình học theo góc chiếu. Các nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng của DHM trong đo biên dạng, đặc trưng hóa vi thấu kính và phân tích hình học bề mặt (Charrière et al., 2006; Kim, 2022; Hernández-Montes et al., 2020).

Trong cấu hình ngoài trục, sóng vật và sóng tham chiếu giao thoa với nhau dưới một góc lệch xác định, tạo ra các vân giao thoa có tần số không gian đặc trưng. Hologram thu được chứa thành phần cường độ nền và các thành phần giao thoa mang thông tin về trường quang học phức. Phép biến đổi Fourier hai chiều cho phép phân tách các thành phần này trong miền tần số không gian; sau khi lựa chọn và lọc vùng phổ thích hợp, trường quang học có thể được tái tạo bằng phép biến đổi Fourier ngược. Kỹ thuật lọc phổ không gian giúp loại bỏ thành phần bậc không và ảnh liên hợp, cho phép khôi phục trường quang học từ một hologram đơn mà không cần thu nhận chuỗi ảnh với các bước dịch pha liên tiếp (Cuche et al., 2000; Schnars and Jüptner, 1994, 2005; Balasubramani et al., 2021). Tuy nhiên, chất lượng tái tạo phụ thuộc vào vị trí và kích thước vùng phổ được lựa chọn, mức độ chồng lấn giữa các thành phần phổ, đặc tính lấy mẫu của cảm biến và nhiễu phát sinh trong quá trình ghi nhận (Cuche et al., 2000; Schnars and Jüptner, 2005).

Một trong những thách thức quan trọng của DHM phản xạ là xác định chính xác pha bề mặt từ pha đo được. Trên thực tế, pha tái tạo không chỉ chứa thông tin về hình học mẫu mà còn chịu ảnh hưởng của độ nghiêng mặt sóng tham chiếu, quang sai của hệ thống, phản xạ ký sinh và nhiễu giao thoa. Đồng thời, phép tính pha trực tiếp từ trường quang học phức chỉ cho giá trị trong khoảng (2\pi), dẫn đến hiện tượng pha quấn khi độ biến thiên chiều cao vượt quá giới hạn tương ứng với một chu kỳ pha. Vì vậy, giải quấn pha và hiệu chỉnh pha nền là các bước thiết yếu để khôi phục biên dạng liên tục và hạn chế sai số hình học (Kim, 2022; Jaedicke et al., 2014; Hernández-Montes et al., 2020; Balasubramani et al., 2021). Các nghiên cứu về bù quang sai và khôi phục pha cho thấy sai lệch pha nền, đặc biệt là các thành phần bậc cao và các vùng pha không liên tục, có thể làm suy giảm đáng kể độ tin cậy của kết quả đo (Jaedicke et al., 2014; Sirico et al., 2022).

Bên cạnh các sai số xử lý pha, độ chính xác của phép đo biên dạng còn phụ thuộc vào bước sóng nguồn sáng, góc chiếu, chiết suất môi trường, độ phân giải không gian của hệ thống và đặc tính phản xạ của mẫu. Đối với những bề mặt có độ chênh cao lớn, các phương pháp giải quấn pha đơn bước sóng có thể gặp khó khăn khi xuất hiện vùng mất tín hiệu hoặc gián đoạn pha. Các kỹ thuật đa bước sóng đã được nghiên cứu nhằm mở rộng khoảng đo theo trục, trong khi các phương pháp hiệu chỉnh pha và đánh giá định lượng được sử dụng để cải thiện độ chính xác của phép đo (Jaedicke et al., 2014; Hernández-Montes et al., 2020; Kim, 2022; Balasubramani et al., 2021). Tuy nhiên, việc kết hợp các bước tái tạo trường phức, hiệu chỉnh pha nền và chuyển đổi pha thành chiều cao cần được xem xét như một quy trình thống nhất, bởi sai số tại mỗi công đoạn có thể lan truyền sang kết quả biên dạng cuối cùng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung vào quy trình tái tạo hologram ngoài trục phản xạ, lọc phổ Fourier, trích xuất và giải quấn pha nhằm khôi phục biên dạng bề mặt vi mô một cách định lượng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Lý thuyết giao thoa

Trong hệ thống kính hiển vi hologram số phản xạ ngoài trục, trường quang học phản xạ từ bề mặt mẫu được kết hợp với trường tham chiếu tại mặt phẳng cảm biến để tạo thành hologram. Giả sử trường vật và trường tham chiếu lần lượt được biểu diễn bởi $O(x, y)$ và $R(x, y)$, cường độ giao thoa ghi nhận trên cảm biến có dạng:

$$I(x,y) = \left|O(x,y) + R(x,y)\right|^2 \quad (1)$$

Khai triển phương trình (1), ta thu được:

$$I(x,y) = \left|O(x,y)\right|^2 + \left|R(x,y)\right|^2 + O(x,y)R^*(x,y) + O^*(x,y)R(x,y) \quad (2)$$

Trong đó, dấu * biểu thị phép liên hợp phức. Hai thành phần $Oê^2$ và $|R|^2$ tạo thành thành phần nền, trong khi OR^* và O^*R chứa thông tin giao thoa liên quan đến trường vật.

Đối với cấu hình ngoài trục, trường tham chiếu có thể được mô hình hóa gần đúng dưới dạng sóng phẳng nghiêng:

$$R(x,y) = A_r \exp[i2\pi(f_{rx}x + f_{ry}y)] \quad (3)$$

trong đó, A_r là biên độ phức của trường tham chiếu; f_{rx} và f_{ry} là các thành phần tần số không gian theo hai phương x và y, tương ứng với góc nghiêng của sóng tham chiếu.

Nếu trường vật được biểu diễn bởi

$$O(x,y) = A_0(x,y)\exp[i\phi_0(x,y)] \quad (4)$$

thì thành phần giao thoa OR^* có dạng:

$$O(x,y)R^*(x,y) = A_0(x,y)A_r^* \times \exp\{i[\phi_0(x,y) - 2\pi(f_{rx}x + f_{ry}y)]\} \quad (5)$$

Phương trình (5) cho thấy thông tin pha của trường vật được điều biến bởi sóng tham chiếu nghiêng. Nhờ đó, thành phần giao thoa được dịch chuyển khỏi vùng phổ trung tâm, tạo điều kiện để tách phổ bằng phép biến đổi Fourier hai chiều.

Góc ngoài trục cần được lựa chọn sao cho các thành phần phổ không chồng lấn đáng kể, đồng thời nằm trong giới hạn lấy mẫu của cảm biến. Nếu góc quá nhỏ, các thành phần phổ có thể chồng lấn; ngược lại, nếu góc quá lớn, tần số vân có thể vượt quá giới hạn Nyquist, làm suy giảm chất lượng tái tạo.

2.2. Tái tạo trường quang học phức bằng lọc Fourier

Thực hiện phép biến đổi Fourier hai chiều đối với hologram $I(x, y)$, ta thu được phổ không gian:

$$H(f_x, f_y) = \mathcal{F}_{2D}\{I(x,y)\} \quad (6)$$

Trong miền tần số không gian, phổ hologram bao gồm thành phần nền gần vùng tần số bằng không và hai thành phần phổ liên hợp được dịch chuyển khỏi tâm phổ. Một trong hai thành phần phổ bên được lựa chọn để tái tạo trường vật.

Gọi $M(f_x,f_y)$ là hàm cửa sổ lọc phổ, được xác định bằng:

$$M(f_x, f_y) = \begin{cases} 1, & (f_x, f_y) \in \Omega, \\ 0, & (f_x, f_y) \notin \Omega, \end{cases} \quad (7)$$

trong đó Ω là vùng phổ được lựa chọn.

Phổ sau khi lọc được tính bởi:

$$H_f(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)M(f_x, f_y) \quad (8)$$

Thực hiện phép biến đổi Fourier ngược, trường giao thoa phức được tái tạo theo:

$$C(x,y) = \mathcal{F}_{2D}^{-1}\{H_f(f_x, f_y)\} \quad (9)$$

Do thành phần phổ được lựa chọn mang theo hệ số điều biến của sóng tham chiếu, trường *C(x, y)* nói chung chưa phải là trường vật đã được hiệu chỉnh hoàn toàn. Với trường tham chiếu dạng sóng phẳng, có thể loại bỏ thành phần pha tuyến tính do sóng tham chiếu gây ra thông qua phép nhân với hàm bù pha thích hợp. Trong trường hợp cần xác định trường vật theo đơn vị biên độ tuyệt đối, cần hiệu chuẩn thêm biên độ và pha của hệ thống.

Sau quá trình hiệu chỉnh, trường quang học phức được biểu diễn dưới dạng:

$$U(x,y) = A(x,y)\exp[i\phi_w(x,y)] \quad (10)$$

Trong đó, biên độ và pha quấn được xác định bởi:

$$A(x,y) = |U(x,y)| \quad (11)$$

$$\phi_\omega(x,y) = \arg[U(x,y)] = \text{atan2}(\text{Im}U, \text{Re}U) \quad (12)$$

Pha $\phi_\omega(x,y)$ thu được từ phương trình (12) thường nằm trong khoảng (-π đến π). Vì vậy, khi độ biến thiên pha của bề mặt vượt quá 2π, bản đồ pha xuất hiện các bước nhảy không liên tục. Để khôi phục biên dạng bề mặt, cần giải quấn pha và loại bỏ các thành phần pha không thuộc về hình học thực của mẫu.

2.3. Quan hệ giữa pha quang học và biên dạng bề mặt

Xét một bề mặt phản xạ có độ cao *h(x, y)* so với mặt phẳng tham chiếu. Khi bề mặt dịch chuyển theo phương pháp tuyến, quang lộ của ánh sáng phản xạ thay đổi do sự thay đổi chiều dài đường truyền của tia tới và tia phản xạ.

Đối với môi trường đồng nhất có chiết suất n, bước sóng trong chân không λ và góc chiếu thetha θ đo từ pháp tuyến bề mặt, độ biến thiên quang lộ có thể được xấp xỉ bởi:

$$\Delta\text{OPL}(x,y) = 2nh(x,y)\cos\theta \quad (13)$$

Độ biến thiên pha tương ứng được xác định theo:

$$\Delta\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta\text{OPL}(x,y) \quad (14)$$

Thay phương trình (13) vào phương trình (14), ta thu được:

$$\Delta\phi(x,y) = \frac{4\pi n\cos\theta}{\lambda_0}h(x,y) \quad (15)$$

Do đó, biên dạng chiều cao tương đối của bề mặt được xác định bởi:

$$h(x,y) = \frac{\lambda_0}{4\pi n\cos\theta}\Delta\phi(x,y) \quad (16)$$

Trong trường hợp mẫu được đo trong không khí, có thể lấy gần đúng \(n\approx1\). Nếu góc chiếu gần vuông góc với bề mặt, tức \(\theta\approx0\), phương trình (16) được rút gọn thành:

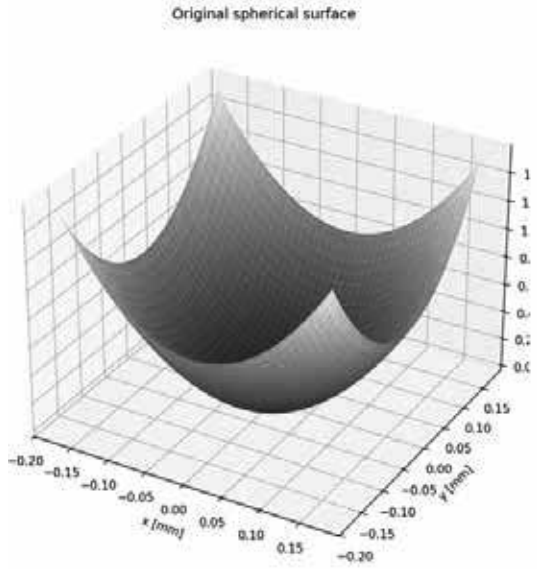
$$h(x,y) \approx \frac{\lambda_0}{4\pi}\Delta\phi(x,y) \quad (17)$$

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Các thông số hệ thống đã xác định gồm laser He–Ne với l = 632,8 nm, vật kính 20× với NA = 0,40, camera 2048 × 2048 pixels và kích thước pixel 3,45 μm; góc lệch chùm tham khảo bằng 3.154^0.

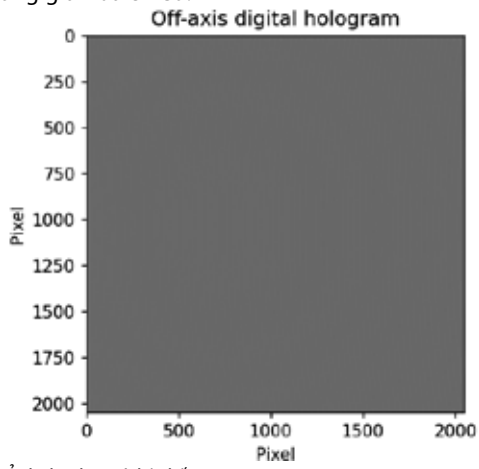
Quy trình xử lý số gồm tám bước chính: tạo hologram, biến đổi Fourier, phát hiện bậc nhiễu xạ −1, lọc phổ, tái tạo trường phức, giải quấn pha, chuyển đổi pha thành chiều cao và đánh giá sai số RMSE.

Một biên dạng bề mặt dạng cầu như chỉ ra ở Hình 1 được đo. Một biên dạng bề mặt dạng cầu như chỉ ra ở Hình 1 được đo. Bề mặt này có dạng hình học lõm đối xứng với hệ tọa độ xvà y trải dài từ khoảng -0.20 mm đến 0.15mm. Điểm thấp nhất của biên dạng nằm ở vị trí trung tâm, trong khi độ cao tăng dần đều và mượt mà khi hướng ra các mép biên xung quanh. Sự thay đổi chiều cao này được minh họa qua dải màu gradient chuyển từ vùng tối ở đáy trung tâm sang màu xanh lá và vàng rực ở các góc ngoài cùng.

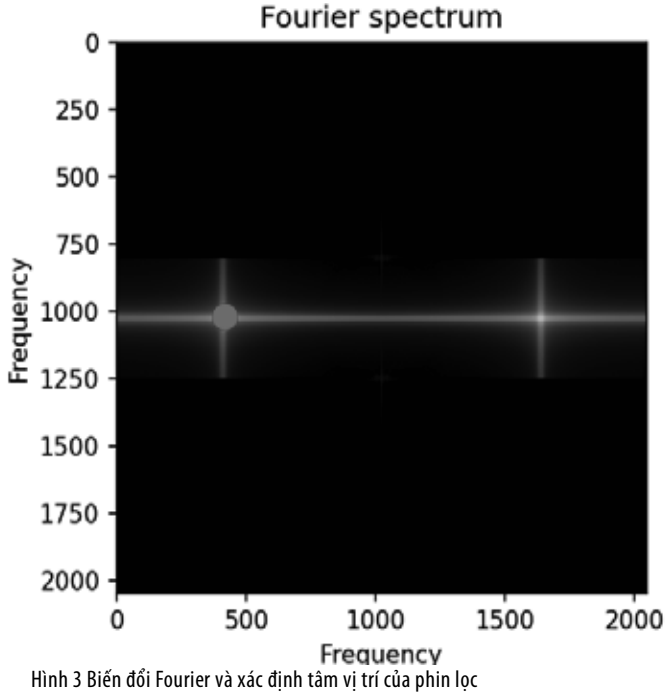


Hình 1. Biên dạng bề mặt gốc cần đo

Để liên hệ biên dạng vật dạng cầu (đã mô tả ở Hình 1) với ảnh hologram số ngoài trục thu được (Hình 2) và các thông số hệ thống quang học giao thoa, chúng ta có thể kết hợp diễn giải thành một đoạn văn mô tả quá trình tạo ảnh. Từ biên dạng bề mặt cầu lõm với độ sâu và độ cong xác định (như chỉ ra ở Hình 1), sóng ánh sáng phản xạ từ bề mặt vật thể này sẽ mang theo thông tin pha tương ứng với độ lệch quang trình. Khi sóng đối tượng này giao thoa với một chùm tia tham chiếu dưới một góc lệch nhất định tại mặt phẳng cảm biến, hệ thống thu được ảnh hologram số ngoài trục có kích thước 2048 × 2048 pixels (Hình 2). Cấu trúc vân giao thoa vi mô đồng nhất trên nền xám của ảnh hologram phản ánh toàn bộ thông tin biên độ và pha của biên dạng bề mặt cầu, đóng vai trò là dữ liệu đầu vào quan trọng cho các thuật toán tái tạo số để phục hồi lại hình thái học của vật thể trong không gian ba chiều.

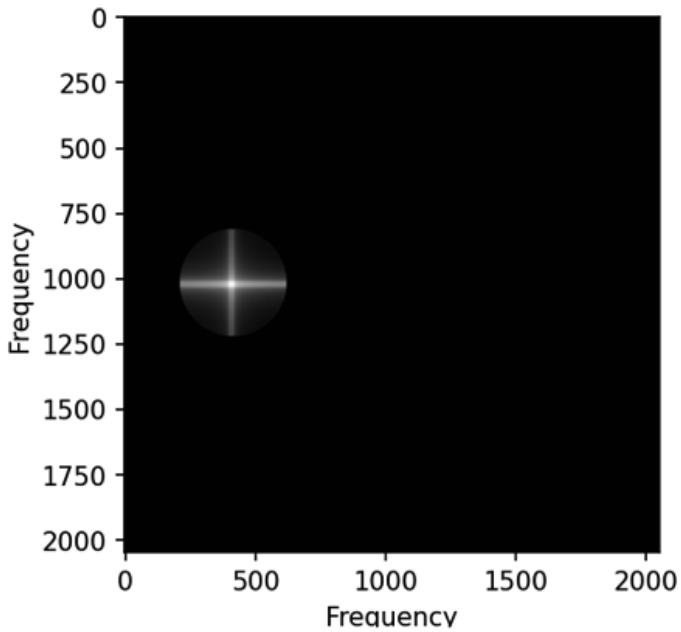


Hình 2. Ảnh thu được từ hệ thống



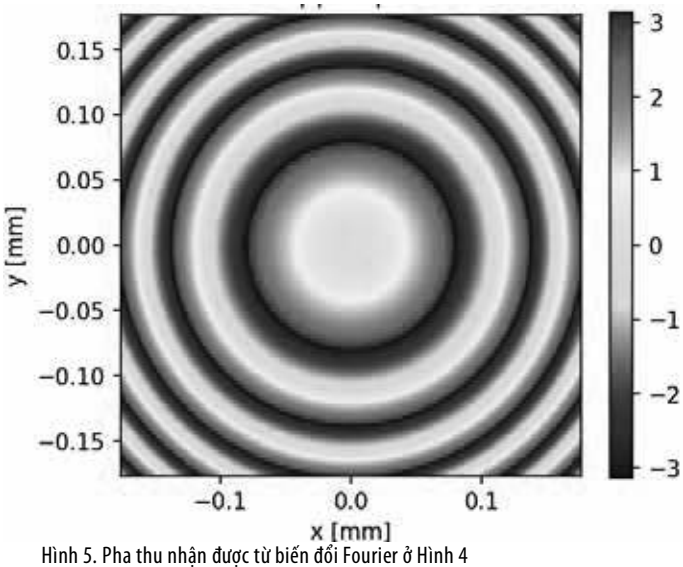
Hình 3 Biến đổi Fourier và xác định tâm vị trí của phin lọc

Để xử lý dữ liệu từ ảnh hologram số ngoài trục, phép biến đổi Fourier được áp dụng để chuyển đổi tín hiệu sang miền tần số không gian. Trên phổ Fourier này, việc xác định chính xác tâm và vị trí vùng lấy thông tin (được đánh dấu bằng chấm đỏ) là cơ sở quan trọng để thiết lập phin lọc không gian, giúp cách ly trọn vẹn thành phần tín hiệu hữu ích nhằm phục vụ cho quá trình trích xuất pha và tái tạo biên dạng bề mặt vật thể.



Hình 4. Vùng tín hiệu hiệu dụng sử dụng khôi phục viên dạng bề mặt

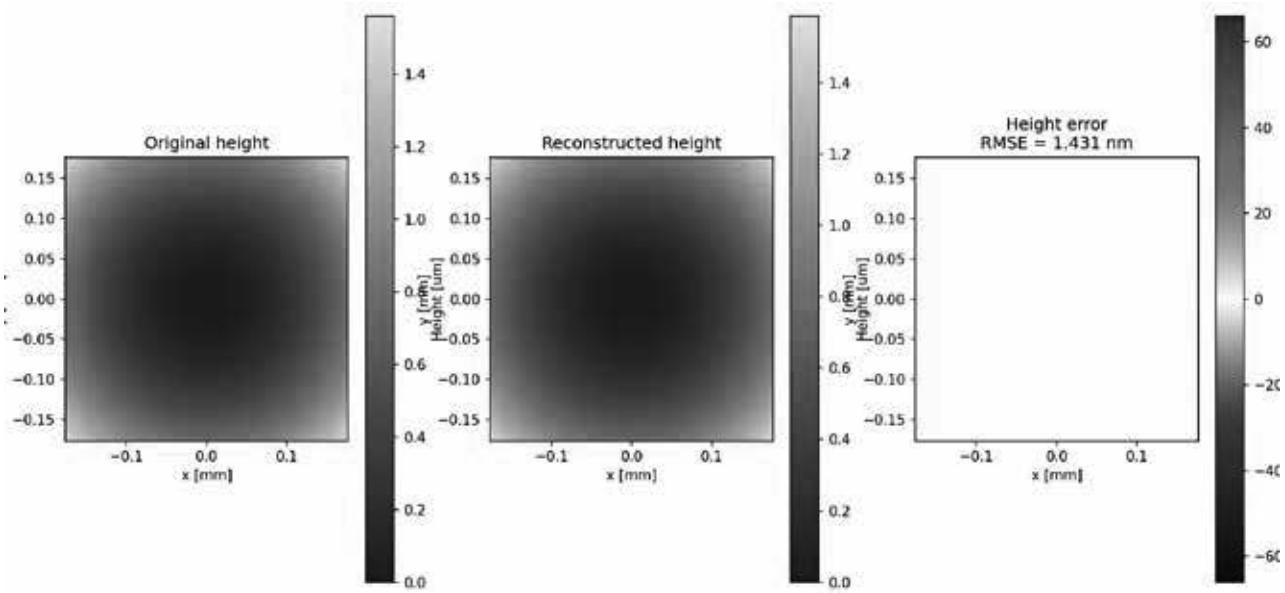
Sau khi xác định được tâm của thành phần phổ hữu ích, bước tiếp theo là thiết lập vùng lọc để cô lập hoàn toàn tín hiệu cần thiết cho quá trình tái tạo. Vùng tín hiệu hiệu dụng này được tính toán kỹ lưỡng và lấy bằng chính xác kích thước phin lọc của vật kính hiển vi quang học. Hình 4 minh họa trực quan kích thước và hình thái của phin lọc được áp dụng để trích xuất dải tần số mong muốn. Việc giới hạn kích thước theo thông số vật kính giúp loại bỏ các thành phần nhiễu ngoại lai và các bậc phổ không liên quan nằm ngoài vùng quan tâm. Nhờ đó, thông tin pha và biên độ của sóng phản xạ từ bề mặt vật thể được giữ lại một cách nguyên vẹn và chính xác nhất. Kết quả của khâu lọc tần số này sẽ tạo ra nền tảng dữ liệu sạch, đảm bảo độ tin cậy cao cho các bước khôi phục biên dạng bề mặt ở giai đoạn tiếp theo.



Hình 5. Pha thu nhận được từ biến đổi Fourier ở Hình 4

Dựa trên vùng tín hiệu hiệu dụng đã lọc ở Hình 4, pha ban đầu của sóng đối tượng được trích xuất và hiển thị trực quan tại Hình 5. Bản đồ pha thu nhận được thể hiện dưới dạng các vòng đồng tâm lan tỏa đều đặn từ tâm ra các phía theo hệ tọa độ không gian *x* và *y*. Thang màu ở bên phải minh họa dải giá trị pha dao động từ khoảng -3 đến 3 radian. Tuy nhiên, quan sát kỹ hình ảnh có thể nhận thấy pha thu nhận được vẫn ở trạng thái chưa liên tục do bị giới hạn trong khoảng giá trị tuần hoàn. Sự chưa liên tục này biểu hiện rõ nét qua các đường biên nhảy vọt đột ngột giữa mức màu đỏ cao nhất và mức màu xanh đậm thấp nhất trên các vòng tròn đồng tâm. Do đó, trường pha này cần phải trải qua các bước xử lý mở pha (phase unwrapping) tiếp theo để có thể khôi phục chính xác biên dạng bề mặt ba chiều của vật thể.

Sau khi thực hiện thuật toán mở pha, dữ liệu pha không liên tục được chuyển hóa thành bản đồ pha liên toàn phần, qua đó xác định mối quan hệ trực tiếp giữa độ cao bề mặt và pha quang học. Kết quả khôi phục biên dạng cuối cùng được minh họa tổng quan tại Hình 6 gồm ba biểu đồ thành phần: chiều cao gốc, chiều cao khôi phục và sai số chiều cao. Biểu đồ chiều cao gốc thể hiện phân bố độ sâu đối xứng của vật mẫu dạng cầu với giá trị nằm trong khoảng từ 0.0 đến 1.4µm. Kế tiếp, biểu đồ chiều cao khôi phục tái hiện lại thành công biên dạng lõm cầu một cách mượt mà và đồng nhất với độ chính xác tương đương biểu đồ gốc. Biểu đồ thứ ba minh họa sai số chiều cao giữa hai mô hình với giá trị sai số căn bậc hai trung bình (RMSE) đạt cực kỳ nhỏ, chỉ khoảng 1.431nm. Qua việc so sánh trực quan và định lượng, biểu đồ sai số gần như phẳng hoàn toàn và tập trung quanh mức giá trị 0, chứng minh hệ thống đo lường và thuật toán xử lý đạt độ tin cậy rất cao. Do đó, phương pháp số hóa và tái tạo biên dạng bề mặt cầu quang học này hoàn toàn đáp ứng tốt các yêu cầu kiểm tra hình học chính xác.



(a) *(b)* *(c)*

Hình 6. (a) Biên dạng gốc; (b) Biên dạng khôi phục (c) Sai số

4. KẾT LUẬN

Quá trình mô phỏng và tái tạo biên dạng bề mặt cầu quang học thông qua hệ thống hologram kỹ thuật số ngoài trục đã được thực hiện và hoàn thiện thành công. Bắt đầu từ mô hình biên dạng bề mặt gốc, hệ thống đã thu nhận ảnh hologram số, chuyển đổi dữ liệu sang miền tần số không gian bằng phép biến đổi Fourier, và áp dụng phin lọc có kích thước chuẩn theo thông số của vật kính hiển vi quang học để cô lập tín hiệu hiệu dụng. Tiếp theo, từ trường pha ban đầu còn ở trạng thái tuần hoàn và chưa liên tục, thuật toán mở pha đã được áp dụng để thiết lập mối quan hệ chính xác giữa pha và độ cao. Kết quả khôi phục biên dạng cuối cùng cho thấy sự trùng khớp rất cao với bề mặt ban đầu, trong đó sai số chiều cao có giá trị RMSE cực kỳ nhỏ, chỉ đạt 1.431nm. Những kết quả này khẳng định độ tin cậy, tính chính xác và hiệu quả vượt trội của phương pháp trong việc ứng dụng vào đo đạc, đánh giá và kiểm tra hình học bề mặt quang học.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] B. Kemper and G. von Bally. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection, Applied Optics, vol. 47, no. 4, pp. A52-A61, 2008, doi: 10.1364/AO.47.000A52.

[2] M. Paturzo, V. Pagliarulo, V. Bianco, P. Memmolo, L. Miccio, F. Merola and P. Ferraro. Digital holography, a metrological tool for quantitative analysis: Trends and future applications. Optics and Lasers in Engineering, vol. 104, pp. 32-47, 2018, doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.11.013.

[3] M. K. Kim. Phase microscopy and surface profilometry by digital holography. Light: Advanced Manufacturing, vol. 3, Arti. 19, 2022, doi: 10.37188/lam.2022.019.

[4] U. Schnars and W. Jüptner. Digital Holography: Digital Hologram Recording. Numerical Reconstruction and Related Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, doi: 10.1007/b138284.

[5] M. Valin Fernández, E. Gonçalves, J. L. Valin Riviera, J. Ricardo, M. E. Fernandez-Abreu and M. A. P. Vaz. Development of digital holographic microscopy by reflection for analysis of surface. Results in Physics, vol. 11, pp. 182-187, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.08.050.

[6] F. Charrière, J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort, E. Cuche, Y. Emery, K. Weible, P. Marquet and C. Depeursinge. Characterization of microlenses by digital holographic microscopy. Applied Optics, vol. 45, no. 5, pp. 829-835, 2006, doi: 10.1364/AO.45.000829.

[7] E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography. Applied Optics, vol. 39, no. 23, pp. 4070-4075, 2000, doi: 10.1364/AO.39.004070.

[8] P. Omidi, L. C. M. Yip, H. Wang, M. Diop and J. J. L. Carson. PhaseWare: Phase map retrieval for fringe projection profilometry and off-axis digital holographic interferometry. SoftwareX, vol. 13, Art. 100652, 2021, doi: 10.1016/j.softx.2020.100652.

[9] W. Lyu and Y. Shi. Efficient phase aberration compensation for digital holographic microscopy based on aberration-oriented phase unwrapping. Optics Communications, vol. 554, Art. 130212, 2024, doi: 10.1016/j.optcom.2023.130212.

[10] L. Huang, L. Yan and B. Chen. Phase restoration of digital holographic microscopy with an adaptive reliability mask for phase unwrapping in microstructure testing. Optics and Lasers in Engineering, vol. 138, Art. 106416, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106416.

[11] M. del S. Hernández-Montes, F. Mendoza-Santoyo, M. Flores Moreno, M. de la Torre-Ibarra, L. Silva Acosta, et al. Macro to nano specimen measurements using photons and electrons with digital holographic interferometry: A review. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, vol. 16, Art. 16, 2020.

[12] V. Jaedicke, S. Goebel, N. Koukourakis, N. C. Gerhardt, H. Welp and M. R. Hofmann. Multiwavelength phase unwrapping and aberration correction using depth filtered digital holography. Optics Letters, vol. 39, no. 14, pp. 4160-4163, 2014, doi: 10.1364/OL.39.004160.

[13] U. Schnars and W. Jüptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. Applied Optics, vol. 33, no. 2, pp. 179-181, 1994, doi: 10.1364/AO.33.000179.

[14] Y. Liu, Z. Wang, and J. Huang. Recent progress on aberration compensation and coherent noise suppression in digital holography. Applied Sciences, vol. 8, no. 3, Art. 444, 2018, doi: 10.3390/app8030444.

[15] V. Balasubramani, M. Kujawińska, C. Allier, V. Anand, C.-J. Cheng, C. Depeursinge, N. Hai, S. Juodkazis, J. Kalkman, A. Kuś, M. Lee, P. J. Magistretti, P. Marquet, S. H. Ng, J. Rosen, Y. K. Park and M. Ziemczonok. Roadmap on digital holography-based quantitative phase imaging. Journal of Imaging, vol. 7, no. 12, Art. 252, 2021, doi: 10.3390/jimaging7120252.

■Ngày nhận bài: 28/9/2026 ■Ngày sửa bài 09/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2026

Phân tích vai trò của các thành phần triển khai BIM theo vòng đời của dự án đường sắt đô thị tại Việt Nam

Lifecycle-oriented analysis of BIM implementation components for urban railway projects in Vietnam

> NGÔ THANH THỦY, HUỲNH XUÂN TÍN*
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: tinhx_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu phân tích vai trò theo vòng đời của 12 thành phần thuộc Khung triển khai BIM đề xuất cho dự án đường sắt đô thị tại Việt Nam bao gồm: cơ chế quản trị; tiêu chuẩn chuyên ngành đường sắt; hợp đồng và lựa chọn nhà thầu; các yêu cầu thông tin; quản lý môi trường dữ liệu chung (CDE); khả năng tương tác dữ liệu; tích hợp 4D/5D; bàn giao thông tin số và bảo đảm tính liên tục giữa mô hình thông tin dự án (PIM) và mô hình thông tin tài sản (AIM); tích hợp GIS-BIM; khai thác AIM/Bản sao số; phát triển năng lực; và bảo đảm chất lượng. Dữ liệu được thu thập bằng khảo sát chuyên gia và mẫu phân tích chính gồm 28 người có ít nhất bốn năm kinh nghiệm áp dụng BIM. Mỗi thành phần được ánh xạ vào năm giai đoạn của vòng đời dự án: chuẩn bị/lập kế hoạch, thiết kế, thi công, nghiệm thu bàn giao và khai thác vận hành. Nghiên cứu sử dụng tỷ lệ lựa chọn theo giai đoạn, kiểm định Cochran's Q, kiểm định McNemar chính xác với hiệu chỉnh Holm, chỉ số bao phủ vòng đời và phân tích độ nhạy theo các ngưỡng 40% - 60%. Kết quả cho thấy 7/12 thành phần có sự thay đổi có ý nghĩa thống kê giữa các giai đoạn. BIM 4D/5D tập trung rõ ở giai đoạn thiết kế thi công, chuyển giao thông tin số và tính liên tục PIM-AIM nổi bật tại vùng trong giai đoạn thi công bàn giao, trong khi AIM/Bản sao số có định hướng mạnh về khai thác bảo trì. Phân tích trên nhóm chuyên gia có ít nhất năm năm kinh nghiệm cho thấy cấu trúc phân loại chính không thay đổi. Kết quả cung cấp cơ sở tổ chức áp dụng BIM theo vòng đời mà không đồng nhất phạm vi vai trò với mức độ quan trọng hoặc thứ tự ưu tiên chiến lược.

Từ khóa: BIM; đường sắt đô thị; vòng đời dự án; quản lý thông tin; quản lý tài sản.

ABSTRACT

This study analyses the lifecycle roles of 12 components of a proposed BIM implementation framework for urban railway projects in Vietnam, including covering governance, railway-specific standards, contracts and procurement, information requirements, common data environment (CDE) management, interoperability, 4D/5D integration, digital handover and project information model (PIM)-asset information model (AIM) continuity, GIS-BIM integration, AIM/Digital Twin use, capability development, and quality assurance. Data were collected through an expert survey, with a primary analytical sample of 28 respondents having at least four years of BIM experience. Each component was mapped to five lifecycle stages: project preparation/planning, design, construction, acceptance-handover and commissioning, and operation-maintenance. The analysis employed stage-selection rates, Cochran's Q tests, exact McNemar post-hoc tests with Holm adjustment, a study-defined lifecycle coverage index, and threshold sensitivity analysis from 40% to 60%. Seven of the 12 components showed statistically significant variation across lifecycle stages. 4D/5D BIM concentrated around design and construction; digital information handover and PIM-AIM continuity were most pronounced around construction-handover; and AIM/Digital Twin showed the clearest orientation toward operation and maintenance. Repeating the primary classification for experts with at least five years of BIM experience produced unchanged component classifications. The findings support lifecycle-oriented BIM implementation planning while clearly separating lifecycle coverage from strategic importance or implementation priority.

Keywords: BIM; urban railway; project lifecycle; information management; asset management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô hình hóa thông tin công trình (Building Information Modelling - BIM) đang chuyển từ vai trò hỗ trợ mô hình hóa và phối hợp thiết kế sang một phương thức quản lý thông tin trong toàn bộ quá trình hình thành, chuyển giao và khai thác tài sản. Đối với hạ tầng đường sắt, yêu cầu này đặc biệt quan trọng do dự án thường bao gồm nhiều hệ thống kỹ thuật có quan hệ phụ thuộc lẫn nhau, nhiều bên tham gia và một giai đoạn khai thác bảo trì kéo dài. Các tổng quan gần đây cho thấy BIM trong lĩnh vực đường sắt đã được nghiên cứu cho thiết kế, thi công, quản lý dữ liệu, khả năng tương tác và quản lý tài sản [1, 2].

Định hướng quản lý thông tin theo vòng đời cũng được thể hiện trong ISO 19650 và TCVN 14177:2024. Theo các tiêu chuẩn này, mô hình thông tin dự án (PIM), mô hình thông tin tài sản (AIM), môi trường dữ liệu chung (CDE), yêu cầu thông tin và các quá trình chuyển giao được tổ chức để hỗ trợ việc tạo lập, kiểm tra, chấp thuận và sử dụng thông tin theo nhu cầu của dự án và tài sản [11 - 13]. Điều này cho thấy BIM theo vòng đời không đơn thuần là kéo dài việc sử dụng mô hình 3D, mà gắn với tính liên tục của quản lý thông tin.

Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu BIM đường sắt hiện nay vẫn tiếp cận vòng đời thông qua từng ứng dụng hoặc phạm vi chức năng cụ thể. Chẳng hạn, các nghiên cứu đã tập trung vào hiệu quả BIM trong thi công [3], BIM 5D cho quản lý chi phí [4], openBIM và quản lý tài sản [5, 6], BIM-GIS [7, 8] hoặc bàn giao tài sản số [9]. Các bằng chứng này rất có giá trị nhưng chưa cho thấy đồng thời một tập hợp đa chiều các thành phần triển khai BIM phân bố như thế nào qua cùng một cấu trúc vòng đời dự án.

Tại Việt Nam, các hướng dẫn áp dụng BIM của Bộ Xây dựng và TCVN 14177 tạo cơ sở ngày càng rõ hơn cho quản lý thông tin trong dự án [12 - 15]. Một số nghiên cứu thực tế cũng đã minh họa khả năng tích hợp BIM-GIS trong quản lý tài sản đường sắt đô thị, điển hình tại ga Tân Cảng, tuyến Metro số 1 TP.HCM [10]. Tuy vậy, bằng chứng thực nghiệm về vai trò theo vòng đời của một hệ thống nhiều thành phần BIM trong bối cảnh đường sắt đô thị Việt Nam vẫn còn hạn chế.

Từ khoảng trống trên, nghiên cứu sử dụng một Khung triển khai BIM đề xuất gồm bốn nhóm và 12 thành phần làm đơn vị phân tích. Mục tiêu là làm rõ "ở đâu và khi nào" từng thành phần có vai trò trong năm giai đoạn của vòng đời dự án, không nhằm xếp hạng mức độ quan trọng hay xác lập ưu tiên chiến lược. Ba câu hỏi nghiên cứu được đặt ra: RQ1: các thành phần BIM có vai trò như thế nào qua năm giai đoạn vòng đời? RQ2: những mẫu hình định hướng vòng đời nào có thể được nhận diện? RQ3: bốn nhóm nội dung thể hiện các phân bố theo vòng đời như thế nào qua các giai đoạn của dự án đường sắt đô thị?

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

2.1. BIM trong hạ tầng đường sắt theo vòng đời

BIM trong đường sắt đã phát triển từ các ứng dụng tập trung vào thiết kế và thi công sang các hướng tiếp cận tích hợp dữ liệu, quản lý tài sản và hỗ trợ ra quyết định. Tổng quan của Malta và cộng sự cho thấy các vấn đề như tiêu chuẩn, khả năng tương tác, cộng tác và bảo trì ngày càng gắn với BIM đường sắt [1]. Tổng quan của Yoo và cộng sự cũng nhấn mạnh rằng nghiên cứu BIM cho tài sản đường sắt đã xuất hiện ở nhiều giai đoạn vòng đời nhưng mức độ bao phủ chưa đồng đều [2].

Ở giai đoạn thiết kế thi công, BIM 4D/5D gắn với phối hợp, tiến độ và chi phí [3, 4]. Ở cuối giai đoạn chuyển giao và trong khai thác, các nghiên cứu chú ý nhiều hơn đến hoàn công, bàn giao tài sản, openBIM, BIM-GIS và quản lý tài sản [5 - 10]. Vì vậy, vòng đời BIM trong đường sắt thể hiện một phổ chức năng thay đổi theo giai đoạn, thay vì một ứng dụng đồng nhất từ đầu đến cuối.

2.2. Quản lý thông tin theo ISO 19650 và TCVN 14177

ISO 19650-1 xác lập các khái niệm và nguyên tắc quản lý thông tin sử dụng BIM trong toàn bộ vòng đời tài sản [11]. Tại Việt Nam, TCVN 14177-1:2024 và TCVN 14177-2:2024 được xây dựng trên cơ sở tham khảo ISO 19650-1:2018 và ISO 19650-2:2018, đồng thời điều chỉnh cho phù hợp với bối cảnh trong nước [12, 13]. Các thuật ngữ như PIM, AIM, CDE và chuyển giao thông tin được chuẩn hóa để hỗ trợ sự liên tục của thông tin từ giai đoạn dự án sang quản lý tài sản.

Các hướng dẫn của Bộ Xây dựng tại Quyết định 347/QĐ-BXD và 348/QĐ-BXD bổ sung cơ sở thực hành cho việc xác định vai trò, trách nhiệm, yêu cầu thông tin, BEP và CDE [14, 15]. Trong nghiên cứu này, các tiêu chuẩn và hướng dẫn trên được sử dụng làm nền tảng cho các thành phần liên quan đến quản trị và quản lý thông tin; còn các thành phần chuyên biệt như 4D/5D, GIS-BIM và Bản sao số được đối chiếu với các nghiên cứu hiện có về đường sắt và hạ tầng.

2.3. Khoảng trống nghiên cứu

Các nghiên cứu hiện có đã chứng minh nhiều ứng dụng BIM trong từng giai đoạn, nhưng còn hạn chế bằng chứng thực nghiệm về cách một hệ thống đa chiều các thành phần triển khai BIM cùng phân bố qua các giai đoạn vòng đời. Khoảng trống này đặc biệt đáng chú ý trong bối cảnh Việt Nam, nơi kinh nghiệm BIM chuyên sâu cho đường sắt đô thị vẫn đang hình thành và nhiều chuyên gia chuyển giao kinh nghiệm từ cầu, đường bộ và hạ tầng giao thông khác.

Do đó, nghiên cứu không đặt mục tiêu "xác nhận khung" hay xác định thành phần nào quan trọng hơn, mà tập trung xây dựng một bức tranh theo vòng đời dự án của 12 thành phần để hỗ trợ tổ chức áp dụng BIM theo từng giai đoạn.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Khung phân tích

Bộ thành phần của Khung phân tích được hình thành dựa trên cơ sở: (i) các nguyên tắc quản lý thông tin của ISO 19650 và TCVN 14177:2024; (ii) các hướng dẫn triển khai BIM tại Việt Nam; và (iii) bằng chứng từ nghiên cứu BIM đường sắt và hạ tầng giao thông. Khung gồm bốn nhóm: D1: môi trường thể chế và quản trị; D2: quản lý thông tin và môi trường dữ liệu; D3: chuyển giao số và vòng đời tài sản; D4: năng lực và bảo đảm triển khai. Mười hai thành phần được đặt tên lần lượt C1 đến C12 được đưa vào khảo sát nhằm cụ thể hóa bốn nhóm này, bao gồm: (1) cơ chế quản trị; (2) tiêu chuẩn chuyên ngành đường sắt; (3) hợp đồng và lựa chọn nhà thầu; (4) các yêu cầu thông tin; (5) quản lý môi trường dữ liệu chung (CDE); (6) khả năng tương tác dữ liệu; (7) tích hợp 4D/5D; (8) bàn giao thông tin số và bảo đảm tính liên tục giữa mô hình thông tin dự án (PIM) và mô hình thông tin tài sản (AIM); (9) tích hợp GIS-BIM; (10) khai thác vận hành/Bản sao số; (11) phát triển năng lực; và (12) bảo đảm chất lượng. Mười hai thành phần này được sử dụng như các đơn vị phân tích theo vòng đời, không phải các tiêu chí để xếp hạng mức độ quan trọng.

Năm giai đoạn vòng đời được xác định gồm: P1: giai đoạn chuẩn bị dự án/lập kế hoạch; P2: giai đoạn thiết kế; P3: giai đoạn thi công xây dựng; P4: giai đoạn nghiệm thu, bàn giao và đưa vào khai thác; P5: giai đoạn khai thác, vận hành và bảo trì.

3.2. Khảo sát chuyên gia và làm sạch dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng khảo sát chuyên gia theo phương pháp chọn mẫu có chủ đích. Bảng hỏi được phát hành trực tuyến qua Google Forms. Tiêu chí chính của bài báo này là người trả lời có ít nhất bốn năm kinh nghiệm trực tiếp về BIM; kinh nghiệm đường sắt/metro được xem là một đặc điểm chuyên môn bổ sung thay vì

điều kiện bắt buộc. Trước khi trả lời, người tham gia xác nhận đồng ý tham gia nghiên cứu.

Tổng cộng 38 phản hồi được ghi nhận. Có 31 người đáp ứng tiêu chí BIM ≥4 năm. Sau kiểm tra logic dữ liệu, ba phản hồi có mâu thuẫn giữa kinh nghiệm đường sắt/metro và số dự án đã tham gia nhưng không thể xác minh được đã bị loại. Hai trường hợp khác được hiệu chỉnh sau khi xác nhận trực tiếp với người trả lời. Mẫu phân tích cuối cùng gồm 28 chuyên gia; trong đó 24 người có ít nhất năm năm kinh nghiệm BIM và được sử dụng cho kiểm tra độ ổn định theo kinh nghiệm.

3.3. Mã hóa và phân tích thống kê

Với mỗi thành phần, chuyên gia lựa chọn tất cả giai đoạn mà họ cho rằng thành phần có vai trò đáng kể. Dữ liệu được mã hóa nhị phân xijp = 1 nếu chuyên gia j lựa chọn giai đoạn p cho thành phần i và bằng 0 nếu không chọn. Tỷ lệ chuyên gia xác định vai trò của thành phần i tại giai đoạn p được tính là Rip = nip/N × 100%, với N = 28.

Để kiểm tra sự thay đổi tỷ lệ lựa chọn giữa năm giai đoạn đối với từng thành phần, nghiên cứu sử dụng kiểm định Cochran's Q [18]. Mười hai giá trị *p* được hiệu chỉnh bằng phương pháp Holm để kiểm soát sai số do thực hiện nhiều kiểm định [21]. Với các thành phần có Cochran's Q còn có ý nghĩa sau hiệu chỉnh, các so sánh cặp được thực hiện bằng kiểm định McNemar chính xác (exact McNemar test) [19, 20], sau đó tiếp tục hiệu chỉnh Holm trong từng thành phần [21].

Để mô tả phạm vi vòng đời, nghiên cứu xác định giai đoạn có tỷ lệ lựa chọn cao nhất (DPi), số giai đoạn đạt ngưỡng 50% (Bi50) và chỉ số bao phủ vòng đời LCIi = (1/5)Σ(Rip/100). LCI là chỉ số mô tả do nghiên cứu xác định, phản ánh mức độ bao phủ tương đối qua năm giai đoạn và không phải chỉ số tầm quan trọng. Quy tắc phân loại chính theo số giai đoạn đạt ngưỡng Bi50 gồm: 0 giai đoạn (phân bố phân tán); 1 giai đoạn (phân bố tập trung theo giai đoạn); 2 giai đoạn liền nhau (phân bố định hướng chuyển tiếp); 2 giai đoạn không liền nhau hoặc 3 giai đoạn (phân bố đa giai đoạn); 4 - 5 giai đoạn (phạm vi vòng đời rộng). Độ nhạy của phân loại được kiểm tra với các ngưỡng 40%, 50% và 60%.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1 Đặc điểm mẫu chuyên gia

Mẫu phân tích cuối cùng gồm 28 chuyên gia, với trung vị kinh nghiệm BIM là 5 năm và trung vị tổng kinh nghiệm xây dựng là 8 năm. Một nửa số chuyên gia có kinh nghiệm trực tiếp với đường sắt, metro; 85,7% có ít nhất năm năm kinh nghiệm BIM. Cơ cấu mẫu đồng thời phản ánh kinh nghiệm đáng kể ở cầu, đường bộ và hạ tầng kỹ thuật, phù hợp với thực tế nguồn nhân lực BIM giao thông tại Việt Nam.

Bảng 1. Đặc điểm chính của mẫu chuyên gia

Đặc điểm	Kết quả
Số chuyên gia trong mẫu phân tích	28
Kinh nghiệm BIM, trung vị [IQR]	5 [5–8] năm
Tổng kinh nghiệm xây dựng, trung vị [IQR]	8 [5–15] năm
Có kinh nghiệm trực tiếp đường sắt/metro	14 (50,0%)
Có ≥ 5 năm kinh nghiệm BIM	24 (85,7%)
Tư vấn BIM*	22 (78,6%)
Điều phối BIM*	20 (71,4%)
Quản lý BIM*	13 (46,4%)
Đã tham gia dự án cầu*	21 (75,0%)
Đã tham gia dự án đường bộ*	21 (75,0%)

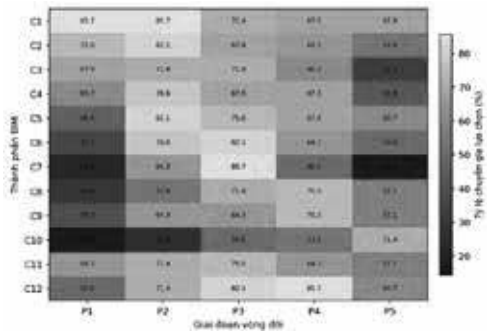
** Câu hỏi cho phép lựa chọn nhiều đáp án nên tổng tỷ lệ có thể vượt 100%*

4.2. Vai trò của các thành phần BIM theo năm giai đoạn

Bảng 2. Tỷ lệ chuyên gia xác định vai trò của 12 thành phần BIM theo vòng đời

Thành phần	P1	P2	P3	P4	P5
C1	24 (85,7%)	24 (85,7%)	20 (71,4%)	19 (67,9%)	19 (67,9%)
C2	21 (75,0%)	23 (82,1%)	19 (67,9%)	18 (64,3%)	15 (53,6%)
C3	19 (67,9%)	20 (71,4%)	20 (71,4%)	17 (60,7%)	9 (32,1%)
C4	17 (60,7%)	22 (78,6%)	19 (67,9%)	19 (67,9%)	12 (42,9%)
C5	13 (46,4%)	23 (82,1%)	21 (75,0%)	19 (67,9%)	17 (60,7%)
C6	10 (35,7%)	22 (78,6%)	23 (82,1%)	18 (64,3%)	14 (50,0%)
C7	6 (21,4%)	18 (64,3%)	24 (85,7%)	14 (50,0%)	4 (14,3%)
C8	8 (28,6%)	15 (53,6%)	20 (71,4%)	21 (75,0%)	16 (57,1%)
C9	11 (39,3%)	18 (64,3%)	18 (64,3%)	21 (75,0%)	16 (57,1%)
C10	4 (14,3%)	7 (25,0%)	14 (50,0%)	15 (53,6%)	20 (71,4%)
C11	18 (64,3%)	20 (71,4%)	21 (75,0%)	18 (64,3%)	16 (57,1%)
C12	14 (50,0%)	20 (71,4%)	23 (82,1%)	24 (85,7%)	17 (60,7%)

Ghi chú: P1 - chuẩn bị/lập kế hoạch; P2 - thiết kế; P3 - thi công; P4 - nghiệm thu, bàn giao và đưa vào khai thác; P5 - khai thác, vận hành và bảo trì



Hình 1. Bản đồ nhiệt về vai trò của 12 thành phần BIM theo năm giai đoạn vòng đời

Bảng 2 và Hình 1 cho thấy các thành phần có phân bố khác nhau. C1 duy trì tỷ lệ lựa chọn cao ở cả năm giai đoạn; C7 tập trung mạnh tại thi công; C8 đạt cao nhất ở P4; còn C10 tăng dần về cuối vòng đời và đạt cao nhất ở P5.

4.3. Sự khác biệt giữa các giai đoạn

Sau hiệu chỉnh Holm, 7/12 thành phần có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa năm giai đoạn, gồm C3, C5, C6, C7, C8, C10 và C12. C7 có mức phân hóa mạnh nhất; C10 thể hiện sự dịch chuyển rõ về P5; trong khi C8 và C12 tăng rõ từ P1 sang vùng P3-P4.

Bảng 3. Kiểm định Cochran's Q về sự khác biệt giữa năm giai đoạn

C	Q	df	p	p-Holm	Khác biệt
C1	12,182	4	0,016	0,080	Không
C2	9,946	4	0,041	0,089	Không
C3	19,111	4	<0,001	0,005	Có
C4	11,913	4	0,018	0,080	Không
C5	14,095	4	0,007	0,042	Có
C6	24,833	4	<0,001	<0,001	Có
C7	42,585	4	<0,001	<0,001	Có
C8	19,630	4	<0,001	0,005	Có
C9	10,745	4	0,030	0,089	Không
C10	27,667	4	<0,001	<0,001	Có
C11	4,471	4	0,346	0,346	Không
C12	19,771	4	<0,001	0,005	Có

Các kiểm định McNemar chính xác cho thấy C3 có P1-P3 cao hơn P5; C6 có P2-P3 cao hơn P1; C7 có P3 cao hơn P1 64,3 điểm phần trăm và cao hơn P5 71,4 điểm phần trăm; C8 có P3-P4 cao hơn P1; C10 có P5 cao hơn P1 57,1 điểm phần trăm và cao hơn P2 46,4 điểm phần trăm; C12 có P3-P4 cao hơn P1. Với C5, kiểm định tổng thể có ý nghĩa nhưng không có cặp riêng lẻ nào còn đạt ý nghĩa sau hiệu chỉnh Holm.

4.4. Mẫu hình vòng đời và độ nhạy

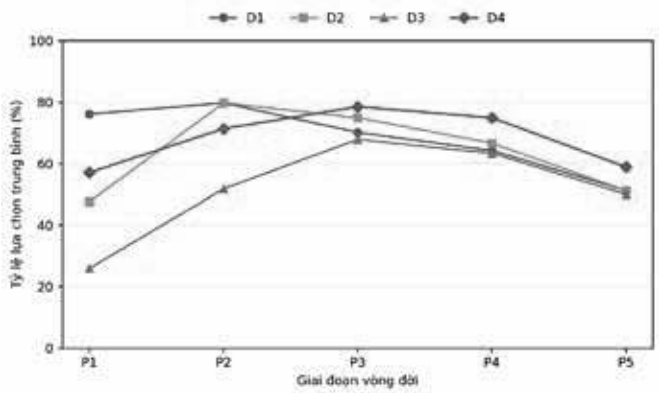
Bảng 4. Chỉ số và mẫu hình vòng đời của các thành phần BIM

C	DP	LCI	B_i50	Mẫu hình 50%	Độ ổn định 40 - 60%
C1	P1/P2	0,757	5	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C2	P2	0,686	5	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C3	P2/P3	0,607	4	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C4	P2	0,636	4	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C5	P2	0,664	4	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C6	P3	0,621	4	Phạm vi vòng đời rộng	Nhạy ngưỡng
C7	P3	0,471	3	Đa giai đoạn	Nhạy ngưỡng
C8	P4	0,571	4	Phạm vi vòng đời rộng	Nhạy ngưỡng
C9	P4	0,600	4	Phạm vi vòng đời rộng	Nhạy ngưỡng
C10	P5	0,429	3	Đa giai đoạn	Nhạy ngưỡng
C11	P3	0,664	5	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định
C12	P4	0,700	5	Phạm vi vòng đời rộng	Ổn định

Ở ngưỡng chính 50%, 10/12 thành phần có phạm vi vòng đời rộng (4 - 5 giai đoạn), còn C7 và C10 là đa giai đoạn. Khi ngưỡng tăng lên 60%, C6 và C9 chuyển thành đa giai đoạn; C7 và C8 thể hiện mẫu hình chuyển tiếp; C10 trở thành tập trung theo giai đoạn tại P5. Bảy thành phần C1-C5, C11 và C12 giữ nguyên mẫu hình trong toàn bộ khoảng 40% - 60%. Khi lặp lại phân loại trên 24 chuyên gia có ít nhất năm năm kinh nghiệm BIM, 12/12 thành phần giữ nguyên mẫu hình ở ngưỡng 50%.

4.5. Phân bố vòng đời của bốn nhóm nội dung

Ở cấp nhóm, D1 có tỷ lệ lựa chọn trung bình cao từ đầu vòng đời và giảm dần về P5; D2 tăng mạnh tại P2 và duy trì ở P3-P4; D3 thấp ở P1 nhưng tăng mạnh từ P2 tới P4; D4 có phân bố tương đối rộng, đặc biệt ở P2-P4. Các giá trị này mô tả vai trò theo vòng đời và không phải trọng số hay thứ tự quan trọng giữa các nhóm.



Hình 2. Phân bố theo vòng đời của bốn nhóm D1-D4

5. THẢO LUẬN

5.1. Các thành phần triển khai BIM và các giai đoạn vòng đời dự án

Kết quả cho thấy các thành phần triển khai BIM không phân bố đồng nhất qua năm giai đoạn. Sau hiệu chỉnh Holm, 7/12 thành phần có sự thay đổi có ý nghĩa thống kê; trong khi các thành phần còn lại duy trì tỷ lệ tương đối rộng hơn. Điều này củng cố cách hiểu rằng BIM theo vòng đời không có nghĩa mọi thành phần đều phải hiện diện tương đương tại mọi thời điểm, mà mỗi thành phần có thể đảm nhiệm một chức năng khác nhau trong quản trị, quản lý thông tin, chuyển giao số và quản lý tài sản.

Kết quả phù hợp với các nghiên cứu về đường sắt gần đây, nơi BIM được ứng dụng từ thiết kế thi công tới bàn giao và khai thác, vận hành và bảo trì, nhưng thường theo từng công nghệ hoặc từng giai đoạn riêng [1 - 10]. Đóng góp của nghiên cứu hiện tại là đặt các thành phần đa chiều vào cùng một ma trận vòng đời để quan sát đồng thời phạm vi và điểm tập trung của chúng.

5.2. Các thành phần hỗ trợ nền tảng có phạm vi vai trò rộng

C1 có LCI = 0,757 và duy trì tỷ lệ lựa chọn cao ở nhiều giai đoạn. C2-C5, C11 và C12 cũng có phạm vi tương đối rộng và ổn định qua phân tích độ nhạy. Điều này gợi ý các nội dung quản trị, tiêu chuẩn, yêu cầu thông tin, CDE, năng lực và bảo đảm chất lượng không chỉ cần được xem xét tại thời điểm khởi tạo BIM mà còn tiếp tục có vai trò khi các bên, sản phẩm thông tin và mục đích sử dụng dữ liệu thay đổi.

Riêng C3 cần được diễn giải thận trọng: mặc dù được xếp vào nhóm phạm vi vòng đời rộng theo quy tắc 4-5 giai đoạn, tỷ lệ lựa chọn giảm còn 32,1% tại P5. Vì vậy, kết quả phù hợp hơn với nhận định rằng cơ chế hợp đồng, lựa chọn nhà thầu và pháp lý có vai trò rộng trong phần lớn các giai đoạn chuyển giao dự án từ chuẩn bị đến bàn giao, nhưng giảm đáng kể khi chuyển sang vận hành.

5.3. C6 và C7 tập trung rõ hơn ở giai đoạn thiết kế thi công

C6 tăng từ 35,7% ở P1 lên 78,6% ở P2 và 82,1% ở P3; P2-P3 đều cao hơn P1 trong phân tích hậu nghiệm. Điều này phản ánh nhu cầu trao đổi thông tin giữa các bộ môn, phần mềm và hệ thống khác nhau trong giai đoạn thiết kế và thi công. Các nghiên cứu về IFC (Industry Foundation Classes - chuẩn dữ liệu mở phục vụ trao đổi thông tin BIM), IDS (Information Delivery Specification - đặc tả yêu cầu thông tin có thể kiểm tra tự động) và kiểm tra yêu cầu thông tin trong dự án đường sắt cũng nhấn mạnh vai trò của khả năng tương tác và kiểm tra sự phù hợp của thông tin trong giai đoạn chuyển giao tài sản [16].

C7 có mức độ tập trung theo giai đoạn rõ nhất: 85,7% tại P3, trong khi P1 chỉ đạt 21,4% và P5 đạt 14,3%. Ở ngưỡng 60%, C7 chuyển thành mẫu hình chuyển tiếp P2-P3. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước về ứng dụng BIM trong thi công đường sắt và BIM 5D [3, 4]. Phạm vi vòng đời hẹp hơn của C7 không hàm ý thành phần này kém quan trọng, mà cho thấy chức năng BIM 4D/5D được khai thác rõ nhất trong giai đoạn thiết kế - thi công.

5.4. C8 và C9 làm rõ vùng chuyển tiếp từ giai đoạn dự án sang giai đoạn khai thác, vận hành và bảo trì tài sản

C8 đạt 71,4% ở P3, cao nhất 75,0% ở P4 và vẫn đạt 57,1% tại P5. Khi tăng ngưỡng lên 60%, C8 thể hiện mẫu hình chuyển tiếp P3-P4. Kết quả này không nên được hiểu là mô hình thông tin dự án (PIM) tự động chuyển thành mô hình thông tin tài sản (AIM) ngay trong giai đoạn thi công. Cách diễn giải phù hợp hơn là quá trình chuẩn bị, hoàn thiện và xác minh thông tin được thực hiện trước thời điểm bàn giao; các thông tin phù hợp sau đó được kiểm tra, xem xét, phê duyệt và chuyển giao để hình thành hoặc cập nhật AIM, qua đó bảo đảm tính liên tục của quản lý thông tin khi chuyển sang giai đoạn khai thác sử dụng và bảo trì. Cách diễn giải này phù hợp với ISO 19650, TCVN 14177 và các nghiên cứu về bàn giao thông tin trong dự án đường sắt đô thị [9], [11 - 13].

C9 có tỷ lệ cao nhất tại P4 (75,0%) và tiếp tục duy trì 57,1% ở P5. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu về tích hợp BIM-GIS phục vụ quản lý tài sản đường sắt [7, 8], đặc biệt là trường hợp nghiên cứu tại ga Tân Cảng, Việt Nam [10]. Tuy nhiên, C9 không còn khác biệt có ý nghĩa thống kê sau hiệu chỉnh Holm; do đó, kết quả phù hợp hơn khi được mô tả như một xu hướng phân bố theo vòng đời, thay vì một mẫu hình chuyển tiếp đã được xác nhận về mặt thống kê.

5.5. C10 có định hướng rõ về khai thác sử dụng và bảo trì nhưng cần được chuẩn bị từ trước

C10 tăng từ 14,3% ở P1 lên 71,4% ở P5 và là thành phần duy nhất trở thành "tập trung theo giai đoạn" ở ngưỡng 60%. Kết quả cho thấy mục đích sử dụng chính của mô hình thông tin tài sản (AIM) và bản sao số nằm ở giai đoạn khai thác sử dụng và bảo trì, phù hợp với các nghiên cứu về BIM mở (openBIM) và quản lý tài sản đường sắt [5, 6].

Tuy nhiên, khoảng một nửa số chuyên gia đã lựa chọn C10 từ P3 - P4. Điều này cho thấy các yêu cầu thông tin tài sản, cấu trúc thông tin

và điều kiện sử dụng AIM/bản sao số cần được xác định và chuẩn bị trước khi tài sản được đưa vào khai thác. Sự khác biệt giữa C8 và C10 vì vậy tương đối rõ: C8 tập trung vào quá trình bàn giao thông tin và bảo đảm tính liên tục từ PIM sang AIM, trong khi C10 tập trung vào việc sử dụng AIM và bản sao số phục vụ quản lý tài sản, khai thác sử dụng và bảo trì.

5.6. Ý nghĩa thực tiễn và giới hạn nghiên cứu

Từ góc độ triển khai, kết quả gợi ý bốn điểm. Thứ nhất, quản trị BIM, yêu cầu thông tin, môi trường dữ liệu chung (CDE), năng lực và bảo đảm chất lượng cần được duy trì trong nhiều giai đoạn của vòng đời. Thứ hai, các ứng dụng BIM 4D/5D cần được chuẩn bị từ giai đoạn thiết kế và được khai thác mạnh trong giai đoạn thi công. Thứ ba, P4 cần được xem là một điểm chuyển tiếp thông tin quan trọng, trong đó quá trình bàn giao bao gồm việc kiểm tra, xem xét, phê duyệt, tổ chức và chuyển giao các thông tin phù hợp. Thứ tư, mô hình thông tin tài sản (AIM) và bản sao số có mục đích sử dụng chính ở P5, nhưng các yêu cầu và cấu trúc thông tin cần được thiết lập từ các giai đoạn trước.

Nghiên cứu có một số giới hạn. Mẫu được lựa chọn có chủ đích và gồm 28 chuyên gia nên không phải là mẫu xác suất đại diện cho toàn ngành. Kinh nghiệm trực tiếp về đường sắt/đường sắt đô thị không phải là điều kiện bắt buộc, phản ánh thực tế nhiều chuyên gia BIM hạ tầng chuyển giao kinh nghiệm từ cầu, đường bộ và các lĩnh vực hạ tầng giao thông khác. Dữ liệu nghiên cứu phản ánh nhận định của chuyên gia, chưa phải là số liệu đo lường mức độ sử dụng BIM trong các dự án đường sắt đô thị cụ thể.

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã phân tích vai trò theo vòng đời của 12 thành phần triển khai BIM đối với dự án đường sắt đô thị tại Việt Nam dựa trên dữ liệu từ 28 chuyên gia. Kết quả cho thấy các thành phần có phân bố theo vòng đời khác nhau: một số nội dung về quản trị và quản lý thông tin có phạm vi vai trò rộng, trong khi C7 tập trung rõ ở giai đoạn thiết kế thi công, C8 nổi bật tại vùng chuyển tiếp từ thi công sang nghiệm thu, bàn giao và đưa vào khai thác, còn C10 có định hướng mạnh về khai thác sử dụng và bảo trì. Sau hiệu chỉnh Holm, 7/12 thành phần có sự thay đổi có ý nghĩa thống kê giữa các giai đoạn.

Kết quả cũng cho thấy việc phân loại theo vòng đời cần được diễn giải đồng thời với tỷ lệ lựa chọn, giai đoạn có tỷ lệ cao nhất và độ nhạy đối với ngưỡng phân loại. Bảy thành phần duy trì mẫu hình ổn định trong khoảng ngưỡng từ 40% - 60%, trong khi C6-C10 có phân bố nhạy hơn với điểm cắt. Khi lặp lại phân tích trên nhóm chuyên gia có ít nhất năm năm kinh nghiệm BIM, cấu trúc phân loại chính của cả 12 thành phần không thay đổi.

Về thực tiễn, triển khai BIM cho dự án đường sắt đô thị nên được tổ chức như một hệ thống gồm các thành phần có phạm vi và trọng tâm vai trò khác nhau trong suốt vòng đời. Đặc biệt, tính liên tục của quản lý thông tin từ mô hình thông tin dự án (PIM) sang mô hình thông tin tài sản (AIM) cần được chuẩn bị trước thời điểm bàn giao nhằm hỗ trợ quản lý tài sản, khai thác sử dụng, bảo trì và các ứng dụng bản sao số. Nghiên cứu này tập trung trả lời câu hỏi "ở đâu và khi nào" các thành phần BIM có vai trò, không nhằm xác định trọng số hoặc thứ tự ưu tiên chiến lược của các thành phần. Các nghiên cứu tiếp theo có thể kiểm chứng các phân bố theo vòng đời bằng dữ liệu từ các dự án thực tế, đồng thời xem xét riêng việc xác nhận cấu trúc khung và đánh giá tầm quan trọng chiến lược của từng thành phần.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Malta, T. Farinha, A. J. Marques Cardoso and M. Mendes. Survey on the use of BIM methodology for railway 3D modeling. Discover Applied Sciences, vol. 6, Art. 657, 2024, doi:10.1007/s42452-024-06316-z.

[2] H. Yoo, W. Chen, D. Yu and T. Broyd. A systematic literature review of Building Information Modelling (BIM) application on railway asset management. Proceedings of the European Conference on Computing in Construction, pp. 918-925, 2024, doi:10.35490/EC3.2024.289.

[3] M.-H. Shin, H.-Y. Kim and J.-F. Liao. Performance Measurement and Analysis of Building Information Modeling (BIM) Applications in the Railway Infrastructure Construction Phase. Applied Sciences, vol. 14, no. 2, Art. 502, 2024, doi:10.3390/app14020502.

[4] O. A. I. Hussain, R. C. Moehler, S. D. C. Walsh and D. D. Ahiaga-Dagbui. Minimizing Cost Overrun in Rail Projects through 5D-BIM: A Systematic Literature Review. Infrastructures, vol. 8, no. 5, Art. 93, 2023, doi:10.3390/infrastructures8050093.

[5] A. Ciccone, S. Di Stasio, D. Asprone, A. Salzano and M. Nicolella. Application of openBIM for the Management of Existing Railway Infrastructure: Case Study of the Cancello-Benevento Railway Line. Sustainability, vol. 14, no. 4, Art. 2283, 2022, doi:10.3390/su14042283.

[6] Z. Liu, J. I. Kim and W. S. Yoo. Decision support for railway track facility management using OpenBIM. Automation in Construction, vol. 168, Art. 105840, 2024, doi:10.1016/j.autcon.2024.105840.

[7] D. Bartonek, J. Bures, O. Vystavel and R. Havlicek. Case Study of Remodelling the As-Built Documentation of a Railway Construction into the BIM and GIS Environment. Applied Sciences, vol. 13, no. 9, Art. 5591, 2023, doi:10.3390/app13095591.

[8] M. Garramone, E. Tonelli and M. Scaioni. A Multi-Scale BIM/GIS Framework for Railways Asset Management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLVI-5/W1-2022, pp. 95-102, 2022, doi:10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-95-2022.

[9] G. Wang and Z. Zhang. BIM implementation in handover management for underground rail transit project: A case study approach. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 108, Art. 103684, 2021, doi:10.1016/j.tust.2020.103684.

[10] L. M. Canh, V. V. Hung and N. C. Phuong. Integration of BIM and GIS on web viewer environment for Tan Cang station asset management. Transportation Research Procedia, vol. 85, pp. 281-288, 2025, doi:10.1016/j.trpro.2025.03.163.

[11] International Organization for Standardization, ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles, Geneva, 2018.

[12] Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam. TCVN 14177-1:2024. Tổ chức và số hóa thông tin về công trình xây dựng, bao gồm mô hình hóa thông tin công trình (BIM) - Quản lý thông tin sử dụng mô hình hóa thông tin công trình - Phần 1: Khái niệm và nguyên tắc, 2024.

[13] Tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam. TCVN 14177-2:2024. Tổ chức và số hóa thông tin về công trình xây dựng, bao gồm mô hình hóa thông tin công trình (BIM) - Quản lý thông tin sử dụng mô hình hóa thông tin công trình - Phần 2: Giai đoạn chuyển giao tài sản, 2024.

[14] Bộ Xây dựng. Quyết định số 347/QĐ-BXD ngày 02/4/2021 Công bố Hướng dẫn chi tiết áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) đối với công trình dân dụng và công trình hạ tầng kỹ thuật đô thị, 2021.

[15] Bộ Xây dựng. Quyết định số 348/QĐ-BXD ngày 02/4/2021 Công bố Hướng dẫn chung áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM), 2021.

[16] M. Wrzosek, T. Owerko, M. Rochel and D. Kasznia. Automating Compliance: Advanced Verification Techniques for Information Requirements in BIM Railway Projects. Geomatics and Environmental Engineering, vol. 19, no. 3, pp. 63-89, 2025, doi:10.7494/geom.2025.19.3.63.

[17] J. J. Cepa, R. M. Pavón, M. G. Alberti, A. Ciccone and D. Asprone. A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure. Applied Sciences, vol. 13, no. 5, Art. 3176, 2023, doi:10.3390/app13053176.

[18] W. G. Cochran. The Comparison of Percentages in Matched Samples. Biometrika, vol. 37, no. 3/4, pp. 256-266, 1950, doi:10.1093/biomet/37.3-4.256.

[19] Q. McNemar. Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. Psychometrika, vol. 12, no. 2, pp. 153-157, 1947, doi:10.1007/BF02295996.

[20] M. W. Fagerland, S. Lydersen and P. Laake. The McNemar test for binary matched-pairs data: mid-p and asymptotic are better than exact conditional. BMC Medical Research Methodology, vol. 13, Art. 91, 2013, doi:10.1186/1471-2288-13-91.

[21] S. Holm. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. Scandinavian Journal of Statistics, vol. 6, no. 2, pp. 65-70, 1979.

■Ngày nhận bài: 08/8/2026 ■Ngày sửa bài: 12/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 04/9/2026

So sánh đặc trưng dòng người thoát hiểm tại hành lang và cầu thang trong chung cư mini

Comparison of evacuation flow characteristics in corridors and stairways of mini-apartment building

> NGUYỄN MINH THIỆN*, TRẦN VŨ TỰ
Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM
*Email: thiennm25.ncs@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá và so sánh mối quan hệ giữa vận tốc, mật độ và lưu lượng của dòng người thoát hiểm tại ba điều kiện chuyển động gồm hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống trong một công trình chung cư mini. Dữ liệu hình học được thu thập từ bản vẽ thiết kế và đo kiểm trực tiếp tại hiện trường. Thời gian di chuyển của người tham gia diễn tập được ghi nhận trên các đoạn khảo sát cố định với sự hỗ trợ của ứng dụng Caynax Sports Tracker cài đặt trên điện thoại thông minh; đồng thời, mô hình PTV Viswalk được thiết lập để tái hiện hai kịch bản thoát xuống và thoát lên. Kết quả cho thấy mật độ và vận tốc có quan hệ nghịch biến rõ rệt ở cả ba vị trí, trong khi mật độ tăng theo lưu lượng theo xu hướng phi tuyến. Khi xem xét đồng thời ba quan hệ vận tốc - mật độ - lưu lượng, hành lang cho khả năng duy trì vận tốc và khả năng thông hành thuận lợi nhất, cầu thang xuống ở mức trung gian, còn cầu thang lên là trường hợp bất lợi nhất do ảnh hưởng đồng thời của hình học bậc thang và yêu cầu nâng trọng tâm cơ thể. Kết quả nghiên cứu cho thấy cần xem hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống như các điều kiện dòng riêng biệt khi đánh giá năng lực thoát nạn và hiệu chỉnh mô hình mô phỏng.

Từ khóa: Dòng người thoát hiểm; vận tốc; lưu lượng; cầu thang; hành lang.

ABSTRACT

This study evaluates and compares the relationships among pedestrian speed, density, and flow rate under three evacuation movement conditions: corridor walking, ascending stairs, and descending stairs in a mini-apartment building. Geometric data were obtained from design drawings and verified by direct field measurements using tape and laser distance meters. Travel times of participants during evacuation drills were recorded over fixed observation sections with the support of the Caynax Sports Tracker application installed on smartphones. A PTV Viswalk model was developed to reproduce two evacuation scenarios, namely downward evacuation to ground level and upward evacuation to the roof. The results indicate a strong inverse relationship between density and speed for all three movement conditions, whereas density increases nonlinearly with flow rate. Considering the three speed-density-flow relationships together, the corridor provides the most favorable movement condition, the descending stair shows an intermediate performance, and the ascending stair is the most restrictive condition because of stair geometry and the additional mechanical effort required to raise the body center of mass. These findings suggest that corridors, ascending stairs, and descending stairs should be treated as distinct pedestrian-flow conditions when assessing evacuation capacity and calibrating simulation models.

Keywords: Pedestrian evacuation; speed; flow rate; stairs; corridor.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tình huống thoát hiểm từ các công trình, đám đông có thể di chuyển qua từng bộ phận của tuyến thoát nạn với tốc độ và năng lực thông hành như thế nào là các câu hỏi cần quan tâm để có những ứng phó tốt giảm tai nạn về người và tài sản. Khi số người còn ít, mỗi cá nhân gần như có thể lựa chọn vận tốc mong muốn; nhưng khi mật độ tăng, khoảng cách giữa người với người thu hẹp, khả năng vượt, đổi hướng và duy trì bước đi giảm dần. Từ đó hình thành mối quan hệ cơ bản giữa vận tốc, mật độ và lưu lượng, thường được mô tả là nền tảng để mô tả trạng thái dòng người, xác định năng lực của cơ sở hạ tầng và đánh giá các tuyến thoát hiểm (Vanumu, Rao và Tiwari (2017). Tuy nhiên, chính tổng quan này cũng chỉ ra một vấn đề quan trọng: mặc dù hình dạng tổng quát của các biểu đồ có thể tương tự nhau, giá trị vận tốc, mật độ tới hạn và lưu lượng cực đại khác biệt đáng kể giữa các loại không gian, điều kiện dòng và phương pháp đo. Vì vậy, việc sử dụng một quan hệ cơ bản giữa vận tốc - mật độ - lưu lượng duy nhất cho toàn bộ tuyến thoát hiểm là khó bảo đảm độ tin cậy.

Hành lang là không gian chuyển động gần như thuần túy theo phương ngang, ít bị chi phối bởi thay đổi cao độ, nên thường được dùng như điều kiện cơ sở khi nghiên cứu động lực học người đi bộ. Các nghiên cứu thực nghiệm về hành lang cho thấy một quy luật khá nhất quán: ở mật độ thấp, vận tốc gần với vận tốc tự do; khi mật độ tăng, tương tác giữa các cá nhân trở nên rõ hơn và vận tốc giảm. Zhang và cộng sự (2011) đã cho thấy các quan hệ vận tốc-mật độ-lưu lượng của dòng người trong hành lang chịu ảnh hưởng của cấu trúc dòng, điều kiện hình học và cách xác định các đại lượng vĩ mô. Điều này có nghĩa rằng ngay ở một không gian tưởng như đơn giản, mối quan hệ cơ bản này đã không phải là một hằng số phổ quát, mà phụ thuộc vào điều kiện vận hành cụ thể. Khi dòng người rời hành lang và tiếp cận cầu thang, đặc trưng chuyển động thay đổi đáng kể. Cầu thang không chỉ làm thay đổi quỹ đạo chuyển động mà còn buộc người đi bộ phải điều chỉnh chiều dài bước, vị trí đặt chân, trạng thái cân bằng và mức tiêu hao năng lượng. Fujiyama và Tyler (2010), khi nghiên cứu vận tốc người đi bộ trên cầu thang, đã chỉ ra rằng tốc độ phụ thuộc đồng thời vào đặc điểm của người sử dụng và đặc điểm hình học của cầu thang; trong đó độ dốc, khối lượng cơ thể và năng lực cơ chân là những yếu tố có ý nghĩa. Kết quả này cho thấy không thể đơn giản lấy vận tốc trên hành lang rồi áp một hệ số cố định để đại diện cho chuyển động trên cầu thang. Burghardt, Seyfried và Klingsch (2013) cũng khẳng định mối quan hệ cơ bản giữa vận tốc-mật độ-lưu lượng trên cầu thang cần được xem xét riêng; dữ liệu thực nghiệm của họ cho thấy năng lực dòng trên cầu thang thấp hơn tuyến ngang và kết quả còn chịu ảnh hưởng của phương pháp đo, điều kiện thí nghiệm hay thực địa và đặc điểm hình học của cầu thang.

Có thể thấy, một tuyến thoát nạn thực tế thường không chỉ gồm một loại không gian; dòng người có thể di chuyển trên hành lang, chuyển tiếp vào cầu thang, đi xuống để thoát ra ngoài, hoặc trong một số loại công trình còn có thể xuất hiện dòng đi lên. Nếu các bộ phận này được mô tả bằng những quan hệ khác nhau, thời gian thoát nạn tổng thể sẽ không chỉ phụ thuộc vào chiều dài quãng đường mà còn phụ thuộc vào sự thay đổi năng lực dòng tại từng vị trí. Đặc biệt, khu vực chuyển tiếp giữa hành lang và cầu thang có thể trở thành nút thắt khi năng lực phía trước thấp hơn dòng đến. Vanumu và cộng sự (2017) nhấn mạnh rằng các quan hệ cơ bản giữa vận tốc - mật độ - lưu lượng khác nhau đáng kể giữa hành lang, nút thắt, cầu thang và các cấu hình dòng, đồng thời cho rằng cần tiếp tục phân tích sự phát triển theo không gian và thời gian của vận tốc, mật độ và lưu lượng trên từng loại cấu kiện giao thông. Do đó, nghiên cứu về các mối quan hệ cơ bản cho ba vị trí: hành lang, lên cầu thang và xuống cầu thang cung cấp cơ sở khoa học phục vụ hiệu chỉnh các mô hình mô phỏng thoát hiểm, đánh giá an toàn cháy và tối ưu hóa thiết kế lối thoát nạn cho các công trình cao tầng trong điều kiện Việt Nam.

2. MỤC TIÊU BÀI BÁO

Mục tiêu của bài báo là xác định và so sánh đặc trưng quan hệ giữa vận tốc, mật độ và lưu lượng của dòng người thoát hiểm tại hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống; qua đó làm rõ mức độ ảnh hưởng của điều kiện hình học và hướng chuyển động đến khả năng thông hành của dòng thoát hiểm. Nghiên cứu đồng thời hướng đến xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm để đối chiếu, hiệu chỉnh mô hình PTV Viswalk và hỗ trợ đánh giá năng lực thông hành của các bộ phận hành lang và cầu thang trong quá trình thoát hiểm. Trên cơ sở đó, bài báo góp phần đề xuất cách tiếp cận không sử dụng một quan hệ vận tốc - mật độ - lưu lượng duy nhất cho toàn bộ tuyến thoát hiểm, mà xem xét riêng từng điều kiện chuyển động.

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong lý thuyết động lực học người đi bộ, trạng thái vĩ mô của một dòng người thường được mô tả bởi ba đại lượng liên hệ chặt chẽ với nhau: vận tốc, mật độ và lưu lượng. Vanumu, Rao và Tiwari (2017) cho rằng quan hệ giữa vận tốc, mật độ và lưu lượng là thành phần cốt lõi để mô tả chuyển động người đi bộ trên các cấu kiện khác nhau như hành lang, nút thắt và cầu thang. Mật độ ρ được hiểu là số người có mặt trong một vùng quan sát chia cho diện tích hữu hiệu của vùng đó. Nếu tại một thời điểm có N người trong diện tích A, mật độ được xác định theo:

$$\rho = N/A \quad (1)$$

trong đó ρ có đơn vị người/m^2. Vận tốc v có thể được tính từ quãng đường quỹ đạo của từng người trong một khoảng thời gian, sau đó lấy trung bình cho nhóm quan sát. Đối với một đoạn có chiều dài L, một cách biểu diễn đơn giản là $v = L/\Delta t$. Lưu lượng toàn phần Q là số người đi qua một tiết diện trong một đơn vị thời gian; nếu chuẩn hóa theo bề rộng hữu hiệu B của lối đi thì thu được lưu lượng riêng q_s. Trong điều kiện dòng tương đối ổn định, ba đại lượng liên hệ bởi phương trình bảo toàn cơ bản:

$$q_s = \rho.v \quad \text{và} \quad Q = B.\rho.v \quad (2)$$

Các nghiên cứu nền tảng về dòng người cho thấy vận tốc có xu hướng giảm khi mật độ tăng. Seyfried và cộng sự (2005), thông qua thí nghiệm chuyển động một hàng, đã chỉ ra mối quan hệ có quy luật giữa vận tốc và mật độ, đồng thời cho thấy mối quan hệ này gắn với không gian chiếm dụng trung bình của mỗi người. Ở mức khái quát, cơ chế này có thể được mô tả bằng một mô hình tuyến tính đơn giản:

$$v(\rho_i) = v_f(1 - \frac{\rho}{\rho_i}) \quad (3)$$

trong đó

v_f: vận tốc dòng tự do

ρ_j: mật độ tắc nghẽn.

Mặc dù đây là mô hình lý tưởng hóa, nó làm rõ một luận điểm quan trọng của nghiên cứu mật độ lớn hơn không đồng nghĩa với thoát được nhiều người hơn. Sau điểm tới hạn, sự suy giảm vận tốc chi phối toàn bộ dòng và làm năng lực thông hành giảm. Một quan hệ phi tuyến được sử dụng rộng rãi hơn là mô hình Weidmann (1993). Tuy nhiên, Vanumu và cộng sự (2017) cho rằng các giá trị của quan hệ lưu lượng-vận tốc-mật độ biến thiên đáng kể theo loại hình công trình, thành phần người đi bộ, phương pháp đo và trạng thái dòng. Do đó, mô hình Weidmann thích hợp để tạo đường tham chiếu, còn các tham số thực nghiệm cho hành lang và cầu thang cần được xác định riêng từ dữ liệu nghiên cứu. Hành lang là trường hợp chuyển động chủ yếu trên mặt phẳng ngang. Khi không bị giới hạn bởi vật cản hoặc mật độ cao, người đi bộ có thể lựa chọn chiều dài bước và tần số bước gần với trạng thái tự do. Ngược lại, trên cầu thang, quỹ đạo chuyển động bị ràng buộc bởi mặt bậc, chiều cao bậc, độ dốc, tay vịn và yêu cầu kiểm soát thăng bằng. Ye và cộng sự (2008) đã xây dựng riêng các quan hệ tốc độ - mật độ và lưu lượng - mật độ cho lối đi ngang, cầu thang lên và cầu thang xuống tại ga metro, cho thấy việc phân tách theo loại cấu kiện là cần thiết. Burghardt, Seyfried và Klingsch (2013) cũng nhấn mạnh ảnh hưởng của phương pháp đo và vùng đo đối với mối quan hệ cơ bản trên của cầu thang; nghiên cứu của họ cho thấy dữ liệu thí nghiệm và dữ liệu thực địa trên cùng cầu thang có thể cho lưu lượng khác nhau, dù xu hướng tổng thể tương đồng. Fujiyama và Tyler (2010), những người xây dựng mô hình dự báo vận tốc trên cầu thang từ đặc điểm người đi bộ và độ dốc cầu thang. Trong điều kiện quan sát thực tế tại nhà ga, Shah, Joshi và Parida (2013) ghi nhận vận tốc xuống cầu thang cao hơn vận tốc lên, đồng thời vận tốc ở cả hai hướng đều giảm khi mật độ tăng. Tuy nhiên, kết quả này còn phụ thuộc bối cảnh; các thí nghiệm trong điều kiện hạn chế tầm nhìn cho thấy chênh lệch vận tốc lên - xuống có thể mất ý nghĩa thống kê.

4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

4.1. Phương pháp thu thập số liệu

Số liệu phục vụ nghiên cứu được thu thập theo phương pháp khảo sát hiện trường kết hợp giữa hồ sơ thiết kế, đo đạc trực tiếp và ghi nhận chuyển động của người tham gia diễn tập thoát hiểm bằng thiết bị di động. Đối tượng khảo sát là công trình nhà ở chung cư mini tại số 101A, đường số 11, phường Thủ Đức, TP.HCM. Công trình có diện tích xây dựng khoảng 145 m², gồm một tầng trệt và hai tầng lầu, với tổng cộng 12 phòng, trong đó có 11 phòng ở và 01 phòng khách. Đây là loại hình công trình có không gian giao thông đứng và ngang tương đối điển hình, phù hợp để quan sát sự thay đổi đặc trưng chuyển động của dòng người tại hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống.

Trước khi tổ chức khảo sát, các thông số hình học của tuyến thoát hiểm được xác định từ bản vẽ thiết kế và được kiểm tra lại tại hiện trường bằng thước dây và thước đo laser. Việc đo đạc trực tiếp nhằm bảo đảm các kích thước sử dụng trong tính toán phản ánh đúng điều kiện khai thác thực tế của công trình, đồng thời xác định chính xác chiều dài đoạn khảo sát và bề rộng hiệu dụng của từng khu vực. Các thông số chính gồm: hành lang chung rộng 2,40 m, bề rộng hiệu dụng 2,10 m; vế thang rộng 1,50 m, bề rộng hiệu dụng 1,20 m, góc dốc xấp xỉ 33°; chiếu nghỉ rộng 1,60 m, bề rộng hiệu dụng 1,40 m; bậc thang cao 0,16 m, mặt bậc rộng 0,30 m và chiều dài một vế thang khoảng 3,00 m. Các vị trí hành lang, vế thang và chiếu nghỉ đồng thời được xem xét như những khu vực có khả năng làm thay đổi vận tốc, mật độ và lưu lượng của dòng người.

Đối với dữ liệu chuyển động, trước buổi diễn tập, nhóm nghiên cứu lập danh sách các cá nhân tham gia, chủ động liên hệ, giải thích mục đích khảo sát và xin sự đồng thuận cài đặt ứng dụng Caynax Sports Tracker trên điện thoại thông minh của người tham gia. Đây là ứng dụng theo dõi hoạt động vận động trên hệ điều hành Android, có khả năng ghi nhận thời gian, quãng đường, tốc độ trung bình và thông tin quỹ đạo dựa trên tín hiệu định vị của thiết bị. Trong nghiên cứu này, ứng dụng được sử dụng như công cụ hỗ trợ ghi nhận diễn biến thời gian di chuyển của từng cá nhân trong quá trình diễn tập.



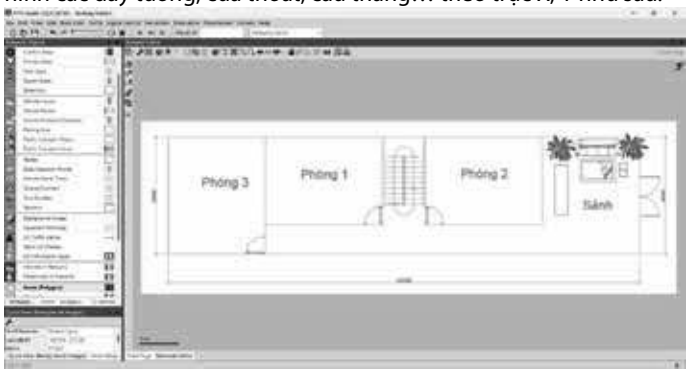
Hình 1. Diễn tập thoát hiểm và giao diện ứng dụng Caynax sports tracker

Tại mỗi khu vực khảo sát, hai mốc đầu-cuối của đoạn đo được xác định trước. Thời điểm người tham gia đi qua mốc đầu và mốc cuối được ghi nhận từ dữ liệu tracking, từ đó xác định thời gian di chuyển Δt trên đoạn có chiều dài L đã biết. Vận tốc trung bình của cá nhân được tính theo biểu thức v = L/Δt. Dữ liệu sau đó được phân nhóm theo ba điều kiện chuyển động gồm hành lang, đi lên cầu thang và đi xuống cầu thang để phục vụ so sánh. Việc kết hợp số liệu hình học đo trực tiếp với dữ liệu thời gian ghi nhận bằng phần mềm giúp tăng tính nhất quán của phép đo, đồng thời tạo cơ sở xác định các đại lượng vận tốc, mật độ và lưu lượng phục vụ phân tích mối quan hệ đặc trưng của dòng người thoát hiểm.

Hạng mục	Kích thước đo đạc	Bề rộng	Ghi chú
Hành lang chung	2,40 m	2,10 m	Vùng thu gom người
Vế thang	1,50 m	1,20 m	Góc dốc ≈ 33°
Chiếu nghỉ	1,60 m	1,40 m	Điểm thắt hình học
Bậc thang	Cao 0,16 m; rộng 0,30 m	—	Chiều dài vế ≈ 3,00 m

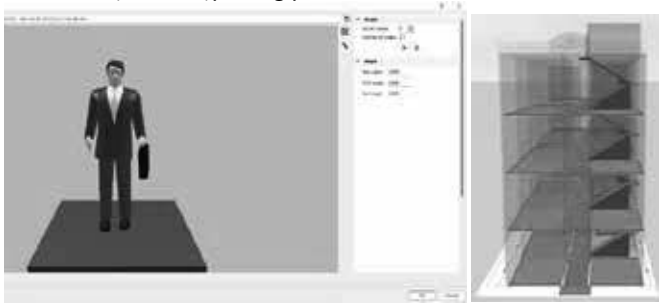
4.2. Thiết lập kịch bản mô phỏng Viswalk

Mô hình mô phỏng dòng người được xây dựng trên phần mềm PTV Viswalk nhằm tái hiện quá trình thoát nạn tại công trình khảo sát và đối chiếu với số liệu thu thập tại hiện trường. Cơ sở hình học của mô hình được thiết lập từ bản vẽ thiết kế kết hợp với số liệu đo đạc thực tế. Từ các thông số đã xác định, mặt bằng công trình được dựng lại trong môi trường Viswalk theo hệ tọa độ X-Y, bao gồm các dãy tường, cửa ra vào, hành lang, vế cầu thang, chiếu nghỉ và các vùng đích thoát nạn. Việc mô hình hóa được thực hiện theo đúng kích thước thực tế để bảo đảm khoảng cách di chuyển, bề rộng lưu thông và các vị trí có khả năng tạo nút thắt hình học được phản ánh tương đối chính xác trong mô phỏng. Mô phỏng MAP (bản đồ) trong Viswalk: Từ kết quả phân tích phần tử của công trình thật, mô hình các dãy tường, cửa thoát, cầu thang… theo trục X, Y như sau:



Hình 2. Mô hình mặt bằng công trình trong Viswalk

Giao diện thiết lập trong phần mềm như sau:



Hình 3. Mô hình thiết lập trong Viswalk

Hai kịch bản thoát nạn được thiết lập để đánh giá ảnh hưởng của hướng di chuyển qua cầu thang. Kịch bản A mô phỏng quá trình thoát xuống, kịch bản B mô phỏng quá trình thoát lên. Việc xây dựng hai kịch bản có cùng cấu trúc tuyến nhưng khác hướng chuyển động cho phép so sánh trực tiếp đặc trưng vận tốc và thời gian di chuyển của dòng người tại hành lang, cầu thang xuống và cầu thang lên. Hai kịch bản mô phỏng trong PTV Viswalk được trình bày dưới dạng lưu đồ nhằm thể hiện rõ trình tự di chuyển của người thoát nạn trong công trình. Kịch bản A mô tả hướng thoát xuống tầng trệt và ra khu vực an toàn; kịch bản B mô tả hướng thoát lên mái như sau:

Kịch bản thoát xuống cầu thang (kịch bản A):



Kịch bản thoát lên trên (kịch bản B):

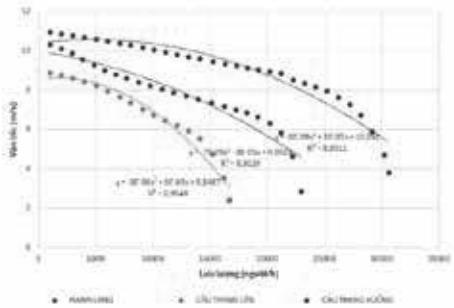


Trong mô hình, các khu vực xuất phát của người thoát nạn được khai báo tại các phòng và các vùng tập trung ban đầu. Các cửa phòng, hành lang và cầu thang được thiết lập thành các phần tử kết nối liên tục để người mô phỏng có thể lựa chọn và di chuyển theo tuyến thoát đã định. Các thông số hình học quan trọng như bề rộng hành lang, bề rộng hiệu dụng của vế thang, kích thước chiếu nghỉ và độ dốc cầu thang được khai báo phù hợp với số liệu hiện trường nhằm hạn chế sai lệch giữa mô hình số và công trình thực. Sau khi hoàn tất thiết lập hình học và các vùng phát sinh - đích đến, mô phỏng được thực hiện cho từng kịch bản. Quá trình di chuyển của từng cá thể được quan sát trực tiếp trên mô hình để kiểm tra tính liên tục của tuyến và khả năng xuất hiện ùn tắc tại cửa phòng, hành lang, vế thang hoặc chiếu nghỉ. Thời gian thoát nạn được ghi nhận từ thời điểm cá thể bắt đầu di chuyển tại vị trí xuất phát đến khi đi vào vùng đích tương ứng. Đồng thời, các đoạn quan sát tại hành lang và cầu thang được lựa chọn tương ứng với các đoạn đo ngoài hiện trường để trích xuất thời gian di chuyển và xác định vận tốc trung bình. Các kết quả mô phỏng của hai kịch bản sau đó được so sánh với số liệu thực nghiệm, qua đó đánh giá mức độ phù hợp của mô hình Viswalk và phân tích sự khác biệt của dòng người giữa hành lang, chuyển động lên cầu thang và chuyển động xuống cầu thang.

5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

5.1. Mối quan hệ giữa lưu lượng và vận tốc

Kết quả nghiên cứu cho mối quan hệ giữa lưu lượng và vận tốc như sau:

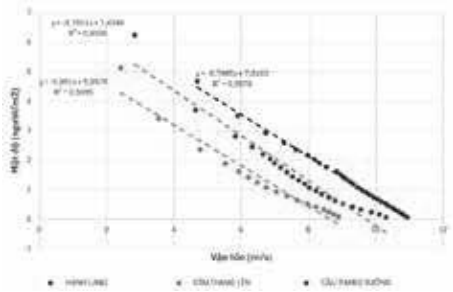


Hình 4. Mối quan hệ giữa lưu lượng và vận tốc

Kết quả Hình 4 cho thấy vận tốc giảm theo sự gia tăng của lưu lượng trong cả ba trường hợp khảo sát. Hàm đa thức bậc hai với hệ số xác định cao, dòng lên cầu thang đạt $R^2 = 0,9648$, dòng xuống cầu thang đạt $R^2 = 0,9311$, đối hành lang là $R^2 = 0,9124$. Kết quả cho thấy lưu lượng là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng duy trì vận tốc của dòng người khi thoát hiểm. Trong phần lớn miền quan sát, khi lưu lượng tăng, vận tốc trung bình có xu hướng giảm, phản ánh sự gia tăng tương tác và cản trở giữa các cá nhân khi số người đi qua tiết diện trong một đơn vị thời gian lớn hơn. Tuy nhiên, mức độ suy giảm không giống nhau giữa hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống. Ở cùng một mức lưu lượng, vận tốc tại hành lang nhìn chung cao nhất, tiếp đến là cầu thang xuống và thấp nhất là cầu thang lên. Xu hướng này cho thấy điều kiện hình học và hướng thay đổi cao độ có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng duy trì vận tốc của dòng người. Dữ liệu hành lang cũng có miền lưu lượng quan sát lớn nhất, đạt trên 30.000 người/h, cho thấy khả năng thông hành của không gian ngang cao hơn so với khu vực cầu thang trong điều kiện khảo sát. Đối với cầu thang lên, phương trình quan hệ với $R^2 = 0,9648$ cho mức độ phù hợp cao nhất trong ba mô hình. Hệ số bậc hai có trị tuyệt đối lớn hơn cho thấy vận tốc giảm nhanh hơn khi lưu lượng tăng. Đây là biểu hiện phù hợp với đặc điểm chuyển động lên cầu thang, khi người tham gia vừa bị giới hạn bởi kích thước bậc và khoảng cách với người phía trước, vừa phải thực hiện công cơ học để nâng trọng tâm cơ thể. Vì vậy, miền lưu lượng của dòng lên chỉ đạt khoảng 16.000 - 17.000 người/h trước khi vận tốc giảm xuống mức thấp. Với cầu thang xuống, quan hệ với $R^2 = 0,9124$ có vận tốc của dòng xuống cao hơn dòng lên ở phần lớn miền lưu lượng nhưng vẫn thấp hơn hành lang, đồng thời suy giảm liên tục khi lưu lượng tăng. Mặc dù chuyển động xuống ít đòi hỏi công nâng cơ thể hơn, người đi bộ vẫn phải điều chỉnh bước chân, giữ cân bằng và duy trì khoảng cách an toàn trên bậc thang. Nhìn chung, kết quả thực nghiệm cho thấy thứ tự về khả năng duy trì vận tốc và miền lưu lượng là hành lang lớn hơn cầu thang xuống, và lớn hơn cầu thang lên.

5.2. Mối quan hệ giữa vận tốc và mật độ

Kết quả nghiên cứu cho mối quan hệ giữa mật độ và vận tốc như sau:



Hình 5. Mối quan hệ giữa vận tốc và mật độ

Kết quả nghiên cứu cho thấy mật độ và vận tốc có mối quan hệ tuyến tính nghịch rất rõ rệt trong cả ba trường hợp. Khi vận tốc tăng, mật độ giảm gần như tuyến tính. Kết quả còn cho thấy mật độ và vận tốc có quan hệ nghịch biến rất rõ tại cả ba vị trí khảo sát. Khi vận tốc tăng, mật độ dòng người giảm gần tuyến tính; ngược lại, khi mật độ tăng thì khả năng duy trì vận tốc bị suy giảm. Xu hướng này phù hợp với cơ chế tương tác của dòng người: khi khoảng cách giữa các cá nhân giảm, không gian lựa chọn bước đi bị hạn chế, tần suất điều chỉnh bước và tránh va chạm tăng lên, từ đó làm giảm vận tốc trung bình của dòng. So sánh tại cùng một mức mật độ cho thấy hành lang có khả năng duy trì vận tốc lớn nhất, tiếp đến là cầu thang xuống và thấp nhất là cầu thang lên. Chẳng hạn, từ các phương trình hồi quy, tại mật độ $\rho = 2$ người/m^2, vận tốc ước tính lần lượt khoảng 8,19 m/s; 7,09 m/s và 5,73 m/s. Khoảng cách giữa ba đường hồi quy cho thấy hình học cầu thang và hướng chuyển động tạo ra sức cản bổ sung đối với dòng người; trong đó chiều đi lên chịu bất lợi lớn hơn do người tham gia phải đồng thời dịch chuyển theo phương ngang và nâng trọng tâm cơ thể.

5.3. Mối quan hệ giữa mật độ và lưu lượng

Kết quả nghiên cứu cho mối quan hệ giữa mật độ và lưu lượng như sau:



Hình 6. Mối quan hệ giữa mật độ và lưu lượng

Kết quả cho thấy mật độ tăng theo lưu lượng và được thể hiện bằng hàm đa thức bậc hai trong cả ba trường hợp khảo sát. Các mô hình hồi quy đều đạt hệ số xác định cao (R^2 từ 0,8466 đến 0,9388), chứng tỏ sự phù hợp tốt giữa dữ liệu thực nghiệm và đường xu hướng. Kết quả nghiên cứu còn cho thấy khi lưu lượng tăng, mật độ có xu hướng tăng theo dạng phi tuyến. Ở vùng lưu lượng thấp, mật độ của ba dòng còn tương đối gần nhau; tuy nhiên khi lưu lượng tăng, các đường hồi quy tách dần, phản ánh sự khác biệt về khả năng tiếp nhận và truyền dòng của từng bộ phận giao thông. Các mô hình bậc hai được sử dụng cho thấy xu hướng cong lên rõ hơn tại cầu thang, đặc biệt là cầu thang lên. Sự khác biệt trở nên rõ ở miền lưu lượng trung bình và cao. Theo phương trình hồi quy, tại Q = 15.000 người/h, mật độ ước tính khoảng 0,78 người/m^2 ở hành lang, 1,42 người/m^2 ở cầu thang xuống và 2,09 người/m^2 ở cầu thang lên. Điều này cho thấy để truyền cùng một lưu lượng, cầu thang cần hình thành mật độ lớn hơn, đặc biệt ở chiều đi lên. Nói cách khác, hành lang có khả năng truyền dòng hiệu quả hơn, trong khi cầu thang là bộ phận dễ tích tụ người và có nguy cơ trở thành nút thắt khi nhu cầu thoát nạn tăng. Đường hồi quy của cầu thang lên có độ cong lớn nhất, phản ánh mật độ tăng nhanh khi lưu lượng tiến tới vùng cao. Đây là dấu hiệu cho thấy năng lực gia tăng lưu lượng trên cầu thang lên bị hạn chế sớm hơn: khi bổ sung thêm người vào dòng, phần gia tăng không còn chuyển hoàn toàn thành lưu lượng mà chủ yếu làm tăng mật độ và tương tác giữa các cá nhân.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và phân tích thành công bộ quan hệ cơ bản của dòng người bao gồm mối quan hệ giữa lưu lượng, vận tốc và mật độ cho ba loại hình không gian thoát hiểm phổ biến trong công trình cao tầng là hành lang, cầu thang lên và cầu thang xuống. Kết quả cho thấy các mối quan hệ cơ bản này đều tuân theo quy luật phi tuyến đặc trưng của dòng người và được mô tả tốt bằng các mô hình hồi quy với hệ số xác định cao ($R^2 > 0,84$). Mối quan hệ giữa lưu lượng và vận tốc cho thấy vận tốc di chuyển giảm khi lưu lượng tăng trong cả ba trường hợp khảo sát. Hành lang duy trì vận tốc lớn nhất và khả năng tiếp nhận lưu lượng cao nhất, trong khi cầu thang lên có tốc độ suy giảm vận tốc nhanh nhất do ảnh hưởng đồng thời của kích thước hình học và di chuyển ngược chiều trọng lực. Kết quả này cho thấy loại hình không gian lưu thông có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả thoát nạn của dòng người. Như vậy, hành lang duy trì vận tốc cao trên một khoảng lưu lượng rộng hơn; cầu thang xuống có mức suy giảm trung gian; còn cầu thang lên giảm vận tốc nhanh và đạt miền vận tốc thấp ở lưu lượng nhỏ hơn. Sự phân tầng này nhất quán với hai biểu đồ còn lại và cho phép xác lập thứ tự hiệu quả truyền dòng trong điều kiện khảo sát: hành lang tốt nhất, tiếp đến cầu thang xuống, và cầu thang lên là trường hợp bất lợi nhất.

Đặc trưng	Hành lang	Cầu thang xuống	Cầu thang lên
Vận tốc tại cùng mật độ	Cao nhất	Trung gian	Thấp nhất
Mật độ tại cùng lưu lượng	Thấp nhất	Trung gian	Cao nhất
Khả năng duy trì lưu lượng cao	Tốt nhất	Trung gian	Hạn chế nhất
Nguy cơ trở thành nút thắt	Thấp hơn	Cao	Cao nhất

Nghiên cứu cho thấy vận tốc, mật độ và lưu lượng không biến đổi độc lập mà tạo thành một hệ quan hệ có tính liên kết. Lưu lượng tăng làm mật độ tích tụ tăng; sự gia tăng mật độ làm giảm vận tốc; và khi vận tốc giảm đủ mạnh, khả năng tiếp tục gia tăng lưu lượng bị hạn chế. Hình học và hướng chuyển động quyết định mức độ của quá trình này. Hành lang có điều kiện chuyển động thuận lợi nhất nên có thể duy trì vận tốc cao hơn ở cùng mật độ và truyền cùng lưu lượng với mật độ thấp hơn. Cầu thang xuống tạo cản trở lớn hơn hành lang nhưng vẫn thuận lợi hơn cầu thang lên. Cầu thang lên là vị trí bất lợi nhất do vừa bị giới hạn bởi hình học bậc thang vừa đòi hỏi công cơ học lớn hơn, làm vận tốc giảm nhanh và mật độ tăng mạnh khi lưu lượng tăng. Kết quả này cho thấy không nên sử dụng một quan hệ vận tốc - mật độ - lưu lượng duy nhất cho toàn bộ tuyến thoát nạn. Hành lang, cầu thang xuống và cầu thang lên cần được xem là ba điều kiện dòng khác nhau khi xác định năng lực thông hành hoặc hiệu chỉnh mô hình Viswalk. Đặc biệt, cầu thang lên cần được xem là bộ phận kiểm soát bất lợi trong các kịch bản thoát lên mái, trong khi ở kịch bản thoát xuống, cầu thang vẫn là vị trí cần ưu tiên kiểm tra nguy cơ tích tụ người so với hành lang. Nghiên cứu này còn có những điểm cần phải phát triển trong tương lai. Đó là dữ liệu hiện tại được thu thập tại một công trình chung cư mini có quy mô và hình học cụ thể, do đó nên mở rộng khảo sát trên nhiều công trình với chiều rộng hành lang, kích thước bậc thang, góc dốc và số tầng khác nhau, đồng thời tăng số lượng người tham gia và số lần lặp lại diễn tập. Việc sử dụng ứng dụng tracking trên điện thoại cần được kiểm chứng bằng một phương pháp đo độc lập khác để có kết quả tin cậy cao. Đối với mô phỏng Viswalk, nghiên cứu tương lai cần thực hiện hiệu chỉnh tham số từ dữ liệu thực nghiệm và kiểm định bằng một bộ dữ liệu độc lập, kết hợp phân tích độ nhạy để xác định các tham số có ảnh hưởng lớn đến kết quả. Các nghiên cứu tiếp theo cũng nên xem xét thêm các yếu tố nhân trắc và hành vi như tuổi, giới tính, thể lực, mức độ quen thuộc với công trình, hành lý mang theo, hành vi theo nhóm và điều kiện khẩn cấp có khói hoặc tầm nhìn hạn chế. Các mở rộng này sẽ giúp xây dựng được các biểu đồ cơ bản của dòng người có tính đại diện cao hơn và nâng cao giá trị ứng dụng của kết quả trong thiết kế, đánh giá và mô phỏng thoát nạn cho các loại hình công trình thực tế.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn anh Võ Trọng Bộ, nhân viên Công ty TNHH Kỹ thuật và Công nghệ V7, đã nhiệt tình hỗ trợ thu thập số liệu thực tế, góp phần quan trọng vào quá trình thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. Burghardt, A. Seyfried and W. Klingsch. Performance of stairs - Fundamental diagram and topographical measurements. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 37, pp. 268-278, 2013, doi: 10.1016/j.trc.2013.05.002.

[2] T. Fujiyama and N. Tyler. Predicting the walking speed of pedestrians on stairs. Transportation Planning and Technology, vol. 33, no. 2, pp. 177-202, 2010, doi: 10.1080/03081061003643770.

[3] Helbing, D., & Molnar, P. Social force model for pedestrian dynamics. Physical review E, vol. 51, no. 5, p. 4282. 1995.

[4] Predtechenskii, V. M., & Milinskiĭ, A. I. Planning for foot traffic flow in buildings. National Bureau of Standards, US Department of Commerce, and the National Science Foundation, Washington, DC. 1978.

[5] PTV Group, PTV Viswalk, version 2021. PTV Group, Karlsruhe, Germany, 2021. Internet: https://www.ptvgroup.com

[6] A. Seyfried, B. Steffen, W. Klingsch and M. Boltes. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, vol. 2005, no. 10, P10002, 2005, doi: 10.1088/1742-5468/2005/10/P10002.

[7] J. Shah, G. J. Joshi and P. Parida. Behavioral characteristics of pedestrian flow on stairway at railway station. Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 104, pp. 688-697, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.163.

[8] L. D. Vanumu, K. R. Rao and G. Tiwari. Fundamental diagrams of pedestrian flow characteristics: A review. European Transport Research Review, vol. 9, article 49, 2017, doi: 10.1007/s12544-017-0264-6.

[9] Võ Trọng Bộ. Nghiên cứu đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến thời gian thoát hiểm trong các chung cư mini: Trường hợp nghiên cứu ở TP Thủ Đức. Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, 2025.

[10] U. Weidmann. Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs. 2nd ed., Schriftenreihe des IVT, no. 90, ETH Zürich, 1993.

[11] J. Ye, X. Chen, C. Yang and J. Wu. Walking behavior and pedestrian flow characteristics for different types of walking facilities. Transportation Research Record, vol. 2048, no. 1, pp. 43-51, 2008, doi: 10.3141/2048-06.

[12] J. Zhang, W. Klingsch, A. Schadschneider and A. Seyfried. Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, vol. 2011, P06004, 2011.

■Ngày nhận bài: 28/7/2026 ■Ngày sửa bài: 03/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/8/2026

Tổ chức và quản lý thông tin công trình xây dựng giai đoạn thiết kế kỹ thuật và thiết kế bản vẽ thi công trên nền tảng BIM

Organization and management of construction information during technical and construction drawing design using BIM

> DƯƠNG TẤT THẮNG[1], TRẦN VĂN TOÀN[2,*], NGUYỄN MẠNH TRƯỜNG[3]
[1]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải; Email: thangdt@utt.edu.vn
[2]Trường Đại học Thủy lợi; [*]Email: tranvantoan@tlu.edu.vn
[3]Đại học Công nghệ Đồng Nai

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất khung tổ chức và quản lý thông tin BIM cho thiết kế kỹ thuật (TKKT) và thiết kế bản vẽ thi công (TKBVTC), nhằm khắc phục tình trạng thiếu đồng bộ giữa mô hình, bản vẽ, khối lượng, dự toán và hồ sơ phát hành. Nghiên cứu sử dụng phương pháp rà soát văn bản pháp luật và tiêu chuẩn, phân tích-đối chiếu yêu cầu thông tin, thiết kế ma trận truy vết và tổng hợp quy trình kiểm soát theo mục đích sử dụng. Kết quả là khung ba lớp thông tin, các ma trận IFC-Pset-Qto, yêu cầu EIR-BEP-MIDP/TIDP, bốn quy trình kiểm soát và bộ tiêu chí có thể đo lường tại các cổng giao nộp. Kết quả nghiên cứu được áp dụng thí điểm thực tế tại Toà nhà Tuyên Sơn (TP Đà Nẵng), một công trình cao tầng ở Việt Nam, để hình thành bộ dữ liệu mô hình BIM, hỗ trợ kiểm tra xung đột và thống kê khối lượng, xuất bản vẽ 2D, nhằm rà soát khung đề xuất. Nghiên cứu không khẳng định hiệu quả định lượng của khung khi chưa thực hiện thử nghiệm so sánh trước-sau.

Từ khóa: BIM; TKKT; TKBVTC; IFC; CDE; yêu cầu thông tin; kiểm soát dữ liệu; đo bóc khối lượng.

ABSTRACT

This paper proposes a BIM-based information management framework for technical design and construction drawing design, addressing inconsistencies between models, drawings, quantities, cost estimates, and issued documents. The study reviews legal and technical requirements, maps information exchanges to project-management uses, and develops traceability matrices and control gates. The proposed results include a three-layer information architecture, IFC-property-quantity mappings, an EIR-BEP-MIDP/TIDP linkage, four workflows and measurable acceptance criteria. An illustrative Vietnamese high-rise BIM delivery report demonstrates the availability of model, clash-checking and quantity data needed for potential implementation. As a full before-and-after evaluation has not been conducted, quantitative efficiency gains are not claimed.

Keywords: BIM; technical design; construction drawings; IFC; common data environment; information requirements; model checking.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TKKT và TKBVTC cụ thể hóa các quyết định thiết kế thành hồ sơ kỹ thuật để kiểm tra, lập dự toán, lựa chọn nhà thầu và tổ chức thi công. Thực tiễn tư vấn thiết kế đòi hỏi sự thống nhất và liên thông thông tin giữa mô hình bộ môn, bản vẽ 2D, thuyết minh, tiên lượng, dự toán và các phiên bản hồ sơ. Khi các sản phẩm này được cập nhật riêng rẽ, tình trạng thiếu đồng bộ có thể xuất hiện ngay cả khi mô hình 3D đã hoàn thành.

Quyết định 258/QĐ-TTg và Hướng dẫn BIM ban hành kèm Quyết định 348/QĐ-BXD tạo định hướng áp dụng BIM; TCVN 14177-1:2024 và TCVN 14177-2:2024 xác lập nguyên tắc và quá trình quản lý thông tin trong giai đoạn chuyển giao tài sản [4 - 7]. Về quản lý dự án, Điều 66 Luật Xây dựng 2014 là cơ sở đối chiếu lịch sử, trong khi Điều 33 Luật Xây dựng 135/2025/QH15 có hiệu lực từ ngày 01/7/2026 là căn cứ hiện hành [1, 2]. Việc thực hiện các thủ tục thiết kế cần đồng thời xem xét Nghị định 217/2026/NĐ-CP và quy định chuyển tiếp áp dụng cho từng dự án [3].

Các nghiên cứu gần đây đã đề cập kiểm toán mô hình và đo bóc tự động [15], quản lý môi trường dữ liệu chung [16], kiểm tra quy tắc chất lượng IFC [17] và đối chiếu khối lượng BIM [18]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về chuẩn hóa quy trình BIM và hỗ trợ công tác thẩm định tiếp tục được công bố [19, 20]. Tuy nhiên,

một khoảng trống ở mức triển khai là chuyển yêu cầu của chủ đầu tư hình thành bộ thuộc tính và điều kiện kiểm tra riêng cho TKKT/TKBVTC, có người chịu trách nhiệm, cổng chấp thuận, dấu vết phát hành và cơ chế đối soát mô hình-bản vẽ-dự toán trong cùng phiên bản.

Đóng góp của bài báo không phải là đề xuất một tiêu chuẩn BIM mới, mà là tích hợp các nguyên tắc đã chuẩn hóa thành: (i) ma trận truy vết yêu cầu thông tin tới cấu kiện, phép kiểm và sản phẩm; (ii) bộ cổng kiểm soát có chỉ số đo được; (iii) quy trình đồng bộ dữ liệu khi thay đổi thiết kế. Phạm vi giới hạn ở quản trị thông tin giai đoạn TKKT/TKBVTC; bài báo đề xuất khung và áp dụng với dự án xây dựng nhà cao tầng thực tế ở Việt Nam, chưa đánh giá hiệu quả thực nghiệm của khung trên mẫu nhiều công trình.

2. CÁCH TIẾP CẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích tài liệu kết hợp thiết kế khung quy trình và đối chiếu khả năng áp dụng. Nguồn phân tích gồm: (a) Luật Xây dựng, Nghị định về quản lý hoạt động xây dựng và lộ trình BIM [1 - 5]; (b) TCVN 14177, ISO 19650, ISO 16739, ISO 29481, chuẩn IDS và tài liệu khoa học [6 - 20]; (c) tài liệu thực hành gồm một BEP áp dụng BIM của dự án công trình cao tầng - Tòa nhà Tuyên Sơn [21, 22].

Quy trình nghiên cứu gồm bốn bước. Bước 1: Rút trích yêu cầu quản lý theo mục đích sử dụng ở TKKT/TKBVTC (phối hợp thiết kế, kiểm tra kỹ thuật, đo bóc, phát hành); Bước 2: Ánh xạ yêu cầu vào dữ liệu (đối tượng, thuộc tính, khối lượng, phân loại, hồ sơ CDE) và chủ thể trách nhiệm, hình thành Bảng 1 - 3; Bước 3: Thiết kế quy trình, phép kiểm, chỉ số và bằng chứng chấp thuận (Hình 1 - 4, Bảng 4 - 6); Bước 4: Đối chiếu các loại sản phẩm và thông tin có trong dự án để xác định thành phần đã có và khoảng thiếu so với khung đề xuất (Bảng 7).

Đơn vị phân tích là một gói thông tin giao nộp theo mốc, không phải toàn bộ tệp mô hình. Tiêu chí đánh giá khung là tính đầy đủ yêu cầu đầu vào, khả năng kiểm tra thuộc tính, bảo toàn định danh và khối lượng khi xuất IFC, kiểm soát xung đột, truy vết phiên bản, phân định trách nhiệm và tính nhất quán với bản vẽ-dự toán. Các ngưỡng minh họa trong bài báo là giá trị đề xuất để thỏa thuận theo EIR/BEP, không được coi là quy định pháp lý chung hoặc kết quả đo tại dự án.

3. KHUNG QUẢN LÝ THÔNG TIN BIM PHỤC VỤ QUẢN LÝ DỰ ÁN

3.1. Yêu cầu thông tin và kế hoạch thực hiện BIM

Chủ đầu tư hoặc bên giao nhiệm vụ xác định yêu cầu trao đổi thông tin (EIR) theo từng mục đích, khu vực, nhóm cấu kiện, thời điểm và điều kiện chấp thuận. Tổ chức thực hiện cụ thể hóa trong BEP; kế hoạch giao nộp thông tin tổng thể (MIDP) và từng nhiệm vụ (TIDP) chỉ rõ bộ môn, đầu ra, định dạng, trách nhiệm và mốc phát hành. Với mỗi nhóm đối tượng, "mức độ thông tin cần thiết" (LOIN) phải mô tả yêu cầu hình học, thông tin chữ-số và tài liệu kèm theo; các nhãn LOD/LOI nếu sử dụng phải được BEP định nghĩa theo hệ quy ước của dự án [6 - 8].

Cụ thể yêu cầu đối với dầm bê tông cốt thép: ở TKKT cần mã cấu kiện, tiết diện, cao độ, vật liệu/cấp bê tông, phân khu, khối lượng theo quy tắc đã thống nhất; ở TKBVTC cần bổ sung chi tiết cấu tạo thuộc phạm vi mô hình hóa, lỗ xuyên, mã bản vẽ và mã công tác liên kết dự toán. Nếu một chi tiết chỉ được thể hiện ở bản vẽ mà không được mô hình hóa, EIR/BEP phải chỉ rõ giới hạn này và quy tắc dẫn chiếu, tránh suy luận rằng mọi thành phần chi tiết đều tồn tại trong IFC.

Bảng 1. Liên kết nội dung quản lý dự án với dữ liệu và yêu cầu kiểm soát

Nội dung quản lý	Dữ liệu/yêu cầu kiểm soát	Yêu cầu kiểm soát
Phạm vi, tiến độ	Phân khu, nhiệm vụ, bộ môn, MIDP/TIDP và mốc phiên bản	Danh mục giao nộp và nhật ký mốc
Chất lượng, an toàn	Cấu kiện, thông số kỹ thuật, quy tắc kiểm tra, xung đột ưu tiên	Checklist, clash/issue log, biên bản kiểm tra
Khối lượng, chi phí	Qto, quy tắc đo bóc, mã công tác và đối soát tiên lượng	Bảng đối soát theo phiên bản, danh mục phần không mô hình hóa
Hợp đồng, thay đổi	Đề nghị thay đổi, người xử lý, đánh giá tác động, mã phiên bản	Change log, quyết định và dấu vết CDE
Hồ sơ, trách nhiệm	Tài liệu thuyết minh, bản vẽ, mô hình và mã mục đích sử dụng	Danh mục phát hành, chứng cứ chấp thuận hợp lệ

3.2. Môi trường dữ liệu chung và thẩm quyền phát hành

CDE được tổ chức với các trạng thái quản lý vùng chứa thông tin WIP (đang phát triển), Shared (được chia sẻ để phối hợp), Published (đã được phát hành theo mục đích được chấp thuận) và Archived (lưu vết). Trạng thái vùng chứa cần tách khỏi mã mục đích sử dụng, mức phù hợp (suitability), số phiên bản và dấu hiệu pháp lý của hồ sơ. Việc Published không mặc nhiên đồng nghĩa "được phép thi công"; chỉ hồ sơ đáp ứng thủ tục thẩm định/phê duyệt/chấp thuận thuộc thẩm quyền theo pháp luật và hợp đồng mới được sử dụng cho mục đích đó [2, 3, 7].

Mỗi gói thông tin tối thiểu cần có mã tài liệu, bên khởi tạo, bộ môn, khu vực, loại tài liệu, mục đích sử dụng, phiên bản, ngày phát hành, người lập, kiểm tra và chấp thuận, cũng như liên kết đến biên bản chuyên môn. Phê duyệt luồng công việc trên CDE là hành vi quản trị dữ liệu; không thay thế quyết định phê duyệt thiết kế của chủ thể có thẩm quyền. Khi có ngoại lệ, hồ sơ phải ghi rõ rủi ro, phạm vi áp dụng, người quyết định và mốc khắc phục, không được dùng ngoại lệ để bỏ qua yêu cầu pháp luật.

3.3. Ma trận truy vết yêu cầu EIR-BEP-MIDP/TIDP

Bảng minh họa dưới đây thể hiện cách triển khai một dòng yêu cầu thông tin; mã dự án, thời điểm và ngưỡng phải được điền chính thức trong EIR/BEP từng dự án, không mặc định áp dụng cho mọi công trình.

Bảng 2. Mẫu ánh xạ một yêu cầu thông tin từ EIR đến nghiệm thu

Trường	Cấu kiện dầm BTCT – TKKT	Bổ sung ở TKBVTC
Mục đích sử dụng	Kiểm tra giải pháp kết cấu, phối hợp không gian, Qto	Kiểm tra lỗ mở và phát hành bản vẽ chi tiết
Định danh, lớp IFC	GUID, mã cấu kiện; IfcBeam trong IFC4	Giữ GUID nếu không thay thực thể; mã bản vẽ liên quan
Thuộc tính bắt buộc	Pset dự án: mã, cấp bê tông, tiết diện, cao độ, bộ môn	Liên kết bản vẽ, mã công tác và trạng thái kiểm tra
Hình học/khối lượng	Vị trí và kích thước đủ kiểm tra; Qto thể tích	Thông số theo phạm vi mô hình hóa; Qto cập nhật
Trách nhiệm và kế hoạch	Kỹ sư kết cấu lập; chủ trì kiểm tra; BIM phối hợp; TIDP mốc TKKT	Cập nhật TIDP ở mốc TKBVTC; kiểm tra độc lập trước phát hành
Định dạng và điều kiện đạt	Tệp gốc + IFC4 + bảng yêu cầu; không thiếu trường bắt buộc theo EIR	Bản vẽ/ PDF/ Qto cùng phiên bản; không còn lỗi cấp nghiêm trọng chưa xử lý

4. CẤU TRÚC DỮ LIỆU BIM/IFC GIAI ĐOẠN TKKT VÀ TKBVTC

Cần phân biệt bốn lớp: (*i*) thực thể IFC và quan hệ biểu diễn cấu trúc/đối tượng; (*ii*) thuộc tính trong IfcPropertySet, liên kết bằng IfcRelDefinesByProperties; (*iii*) khối lượng trong IfcElementQuantity,

cũng liên kết bằng IfcRelDefinesByProperties; (*iv*) siêu dữ liệu phê duyệt, phiên bản, phân quyền, nhật ký xử lý thuộc CDE. Mã phân loại dùng IfcClassificationReference liên kết với đối tượng thông qua IfcRelAssociatesClassification; không coi IfcClassification là trường mã công tác tự động có sẵn trong từng cấu kiện [9, 10].

Phiên bản IFC phải được xác định trong EIR/BEP và xác minh tương thích khi trao đổi. Trường hợp tham chiếu Tuyên Sơn sử dụng tệp "IFC 4.0" theo cách gọi trong báo cáo dự án (IFC4), trong khi ISO 16739-1:2024 mô tả phiên bản IFC4.3; hai phiên bản không nên được đồng nhất. Ví dụ trong bài dùng IfcBeam và các quan hệ dữ liệu tương ứng IFC4, không khẳng định các tệp IFC dự án đã được kiểm thử độc lập nếu chưa có log xuất-nhập [9, 22].

Bảng 3. Ánh xạ cấu trúc dữ liệu, định dạng và trách nhiệm lưu giữ

Nhóm	Biểu diễn gợi ý	Đối tượng quản lý và cách kiểm tra
Định danh, không gian	IfcProject, IfcSite, IfcBuildingStorey, IfcSpace; GlobalId	Tọa độ, đơn vị, phân khu; kiểm tra khớp hệ quy chiếu
Cấu kiện/hệ kỹ thuật	IfcBeam, IfcColumn, IfcSlab, IfcWall, IfcDistributionElement	Kiểm tra đúng lớp IFC, vị trí, hình học và quan hệ không gian
Thuộc tính	IfcPropertySet; IfcRelDefinesByProperties	Quy tắc tên Pset/thuộc tính, kiểu dữ liệu, đơn vị, giá trị rỗng
Khối lượng	IfcElementQuantity và các IfcQuantity*; quan hệ gắn đối tượng	Tên Qto, phương pháp đo, đơn vị đo, nguồn khối lượng
Phân loại/mã công tác	IfcClassificationReference, IfcRelAssociatesClassification; Pset theo BEP	Mã phân loại, hệ mã; bảng ánh xạ mã công tác/định mức riêng
Hồ sơ và phiên bản	IfcDocumentReference (khi phù hợp); metadata CDE ngoài IFC	Số văn bản, trạng thái, lịch sử, chữ ký, phê duyệt pháp lý

4.1. Mức độ thông tin cần thiết theo mục đích sử dụng

Không quy định một mức LOD/LOI đồng loạt cho mọi cấu kiện. TKKT tập trung các thông tin phục vụ kiểm tra giải pháp kỹ thuật và khối lượng chính; TKBVTC bổ sung thông tin cần cho triển khai, lắp đặt, khối lượng chi tiết và giao diện thi công, theo phạm vi được giao. Mọi yêu cầu bổ sung cần gắn với phép kiểm có thể thực hiện, dữ liệu bằng chứng và trách nhiệm của một chủ thể cụ thể.

Bảng 4. LOIN và phép kiểm ở TKKT/TKBVTC

Nhóm đối tượng	TKKT	TKBVTC	Kiểm chứng
Dầm/ cột	Kích thước, tiết diện, cấp vật liệu, mã cấu kiện	Lỗ mở/ chi tiết cấu tạo trong phạm vi BEP, liên kết bản vẽ	IFC class, vật liệu, Qto, so sánh bản vẽ
Ống/ MEP	Tuyến chính, kích thước, cao độ, công suất	Vị trí nhánh/ phụ kiện, không gian thao tác theo phạm vi	Clash + clearance, mã hệ thống
Không gian/ tầng	Mã phòng, diện tích, cao độ, công năng	Phạm vi bàn giao, thông tin hoàn thiện theo yêu cầu	Kiểm tra ranh giới không gian và danh mục
Bảng khối lượng	Khối lượng chính, đơn vị, nhóm công tác	Chi tiết công tác, biện pháp phân tách, phần tính ngoài mô hình	Đối soát phiên bản, quy tắc đo bóc

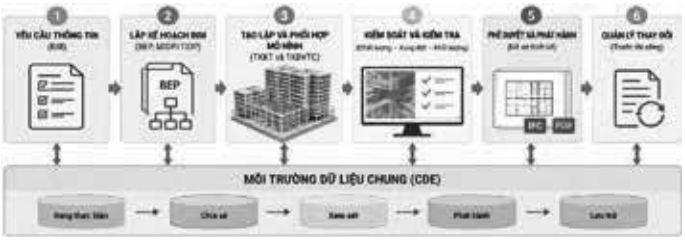
4.2. Kiểm tra bảo toàn dữ liệu khi xuất - nhập IFC

Đối với một mẫu kiểm thử trao đổi độc lập, ghi nhận danh sách GUID, lớp IFC, Pset–thuộc tính-giá trị-đơn vị, Qto và hình học tại tệp gốc; xuất IFC theo phiên bản đã chốt; mở bằng phần mềm kiểm tra độc lập; đối soát và lưu nhật ký. Các trường số có giá trị khác 0 không được tự đổi thành 0,000 vì lỗi chuyển đổi đơn vị, kiểu dữ liệu hoặc làm tròn. Số lượng đối tượng bảo toàn không thể tự thay thế cho phép kiểm nội dung thuộc tính. Nếu thử nghiệm không có tệp dữ liệu thô hoặc log kiểm tra, bài báo chỉ đề xuất phép kiểm chứ không kết luận dữ liệu đã được bảo toàn.

5. QUY TRÌNH KIỂM SOÁT THÔNG TIN THIẾT KẾ TRÊN BIM

5.1. Kiểm soát xung đột

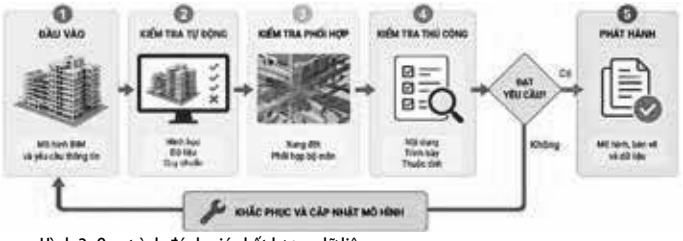
Ma trận xung đột cần xác định cặp bộ môn, loại kiểm tra (va chạm cứng, khoảng hở, xung đột quy tắc), ngưỡng hình học theo mục đích, mức độ nghiêm trọng và người xử lý. Kết quả phần mềm là danh sách phát hiện ban đầu, phải sàng lọc trùng lặp/va chạm được phép, xác định vấn đề kỹ thuật thực sự và lưu dấu vết. Đề xuất ba mức ưu tiên: C1 - xung đột ảnh hưởng an toàn, giải pháp chịu lực, PCCC hoặc không thể thi công; C2 - ảnh hưởng phối hợp/lắp đặt và cần xử lý trước phát hành phạm vi liên quan; C3 - lỗi hình học, biểu diễn hoặc trùng lặp được xử lý theo kế hoạch. Không đồng nhất số lượng clash thô với số lỗi thiết kế đã xác nhận.



Hình 1. Trình tự kiểm soát xung đột/ va chạm

5.2. Kiểm tra chất lượng mô hình

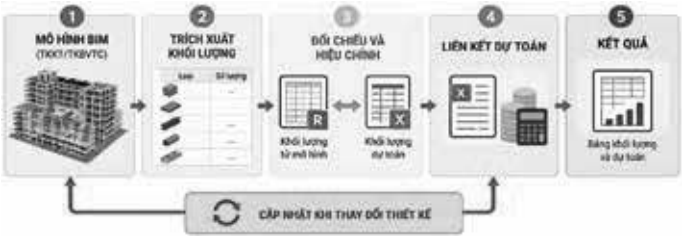
Kiểm tra gồm điều kiện kỹ thuật (hệ tọa độ, hình học, phân loại), nội dung yêu cầu (thuộc tính/đơn vị/giá trị, Qto), kiểm tra trao đổi IFC và kiểm tra khớp hồ sơ. Quy tắc có thể được biểu diễn trong IDS đối với các thuộc tính thuộc khả năng kiểm tra của tiêu chuẩn; các yêu cầu về chữ ký, thẩm quyền pháp lý, chất lượng hồ sơ chuyên môn vẫn phải được kiểm tra qua CDE và hồ sơ ngoài IFC [12, 13, 17].



Hình 2. Quy trình đánh giá chất lượng dữ liệu

5.3. Bóc tách khối lượng và liên kết dự toán

Bảng khối lượng từ mô hình không phải tự động là tiên lượng công tác theo quy định lập dự toán. Cần tách: Qto vật lý của đối tượng; công tác được đo theo quy tắc đo bóc áp dụng; các phần không mô hình hóa (biện pháp, hao hụt, tạm tính, công tác phụ trợ); và mã hiệu công tác/đơn giá theo bộ định mức, hệ số, mặt bằng giá áp dụng tại địa phương. Bảng đối soát phải chỉ rõ từng dòng tiên lượng có nguồn từ GUID/tập GUID, phép tính từ mô hình hay từ hồ sơ ngoài mô hình, phiên bản và người kiểm tra. Không kết luận sai lệch bằng 0 nếu quy tắc và phạm vi hai bảng khác nhau.



Hình 3. Chuỗi đối soát Qto - tiên lượng - dự toán

5.4. Phát hành hồ sơ và kiểm soát thay đổi

Quy trình sử dụng ít nhất bốn cổng: G1 kiểm tra nội bộ của chủ trì bộ môn; G2 kiểm tra phối hợp BIM; G3 đối soát mô hình-bản vẽ-tiên lượng/dự toán và kiểm tra giao nộp; G4 chấp thuận/phê duyệt theo đúng thẩm quyền trong hợp đồng và pháp luật. Chỉ khi các cổng thuộc phạm vi sử dụng được thông qua và thủ tục pháp lý cần thiết hoàn thành, hồ sơ mới được xác định có giá trị sử dụng cho mục đích tương ứng. Mã "AFC" nếu dùng phải gắn với quyền phát hành hồ sơ thi công theo pháp luật, không dựa riêng vào chuyển trạng thái Published.



Hình 4. Chuỗi cổng phát hành và thay đổi

Mọi thay đổi thiết kế cần có yêu cầu thay đổi, bản so sánh GUID/thuộc tính/khối lượng theo phiên bản, tác động tới bản vẽ và tiên lượng, người kiểm tra và quyết định xử lý. Trường hợp có sai khác chưa khép lại, dừng phát hành đối với phạm vi chịu ảnh hưởng; các ngoại lệ kỹ thuật có thể được ghi nhận riêng chỉ khi được phép theo yêu cầu dự án và không trái quy định bắt buộc.

6. CHECKLIST, CHỈ SỐ KIỂM SOÁT VÀ ĐỐI CHIẾU THỰC TIỄN

6.1. Checklist và chỉ số chấp thuận

Bảng 5 thiết lập phép kiểm có mẫu số, ngưỡng và chứng cứ. Mỗi dự án phải phê duyệt ngưỡng trước khi thực hiện; các con số minh họa trong ngoặc là ví dụ điều kiện BEP, không phải giá trị được đo từ tài liệu Tuyên Sơn hay yêu cầu thống nhất cho mọi dự án. Đối với chỉ tiêu định lượng, cần thống nhất quy tắc tính cả các phần không mô hình hóa và bản vẽ được loại trừ có lý do.

Bảng 5. Bộ chỉ số kiểm soát và điều kiện chấp thuận theo cổng

Cổng/chỉ số	Cách đo, nguồn chứng cứ	Điều kiện đề xuất trong EIR/BEP
G1: đầy đủ thuộc tính (C)	C = số trường hợp thuộc tính bắt buộc hợp lệ / tổng trường hợp phải kiểm ×100%; báo cáo IDS/checklist	Thỏa ngưỡng do dự án chốt (ví dụ ≥98%); các trường an toàn bắt buộc đạt 100%
G2: xung đột nghiêm trọng	Số issue C1 còn mở tại mốc giao nộp; báo cáo clash và log đã sàng lọc	Ví dụ 0 issue C1 chưa xử lý; ngoại lệ có hồ sơ và quyền chấp thuận hợp lệ
G3: sai khác khối lượng	$\Delta Q = \lvert Qm-Qc\rvert/\lvert Qc\rvert \times 100\%$ khi $Qc \neq 0$, trên cùng phạm vi/quy tắc; bảng Qto–tiên lượng	Giới hạn theo loại công tác (ví dụ ≤2% cho nhóm đủ điều kiện đối soát); khác biệt phải giải trình
G3: đồng bộ hồ sơ	Số cặp bản vẽ-mô hình-dự toán cùng mã mốc được đối soát / tổng cặp phải soát	100% cặp trọng yếu có biên bản, điểm không phù hợp đã xử lý
G4: hợp lệ phát hành	Mã phiên bản, danh mục, chủ thể ký, quyết định/chấp thuận cần thiết	Đủ hồ sơ, thủ tục theo pháp luật và hợp đồng; Published không tự thay thế phê duyệt

6.2. Vai trò, trách nhiệm và rủi ro quản trị

Trách nhiệm phải phân biệt kỹ sư lập mô hình; chủ trì bộ môn kiểm tra kỹ thuật; BIM Coordinator phối hợp và kiểm tra giao diện; chuyên viên dự toán đối soát Qto; BIM Manager tổ chức quy trình thông tin; chủ đầu tư/ tư vấn quản lý dự án kiểm soát giao nộp theo hợp đồng; và chủ thể có thẩm quyền thẩm định/ phê duyệt thiết kế theo pháp luật. BIM Manager không mặc nhiên có thẩm quyền phê duyệt giải pháp kết cấu hoặc hồ sơ thiết kế.

Bảng 6. Rủi ro, chủ thể xử lý và điều kiện dừng phát hành

Rủi ro	Đơn vị chủ trì xử lý	Điều kiện dừng/cách khép lại
Thiếu thuộc tính IFC/Pset	Tư vấn bộ môn; BIM Coordinator kiểm chứng	Thiếu trường bắt buộc ⟶ sửa và chạy lại rule
Sai Qto hoặc mã công tác	Kỹ sư dự toán + chủ trì bộ môn	Chưa rõ quy tắc/nguồn ⟶ tạm dừng duyệt bảng liên quan
Clash C1 hoặc thiếu lỗ mở	Bộ môn có trách nhiệm; BIM Coordinator theo dõi	C1 mở ⟶ dừng phạm vi liên quan đến khi xử lý
Mô hình và bản vẽ lệch phiên bản	Chủ trì thiết kế và quản trị CDE	Phát hành lại cùng baseline và lưu phiên bản cũ
Chưa có phê duyệt bắt buộc	Chủ đầu tư/chủ thể được pháp luật giao	Không sử dụng cho thi công dù CDE đã Published
Đổi thiết kế chưa đánh giá tác động	Đơn vị khởi tạo thay đổi và chủ trì liên quan	Mở yêu cầu thay đổi, chạy lại kiểm tra và phê duyệt

6.3. Minh họa khả năng áp dụng từ hồ sơ BIM dự án công trình cao tầng

Báo cáo "Kết quả áp dụng BIM - Đợt 2" của dự án Khu nhà ở và dịch vụ Tuyên Sơn, giai đoạn II, năm 2026 [22], thể hiện một trường hợp tư liệu thực tiễn về tổ chức CDE, tạo lập mô hình kiến trúc, kết cấu, cơ điện và PCCC, kiểm tra va chạm, xuất khối lượng, bản vẽ 2D và đóng gói sản phẩm. Theo Bảng 6.1 của báo cáo (trang in 120), có 68.397 cấu kiện được thống kê cho khối đế; các bảng 5.3–5.5 thể hiện số phát hiện va chạm theo cặp bộ môn, các bảng chương 6 thể hiện thống kê số lượng/khối lượng và mục 8.1 ghi nhận đóng gói mô hình gốc, IFC4 và hồ sơ trên CDE. Đây là số liệu báo cáo dự án, không phải số liệu đo lại độc lập của nghiên cứu này.

BEP của một gói tư vấn giám sát khác [21] mô tả các mục về MIDP/TIDP, trạng thái CDE, phân quyền, đặt tên file và kiểm tra mô hình. Hai nguồn được sử dụng để đối chiếu loại dữ liệu và thực hành quản lý; chúng không thuộc cùng một chuỗi nghiệm thu và không được gộp để suy luận kết quả của một dự án thống nhất.

Bảng 7. Đối chiếu sản phẩm hiện có và yêu cầu kiểm chứng bổ sung

Thành phần khung đề xuất	Minh chứng trong tài liệu [21, 22]	Chưa đủ căn cứ/để xuất kiểm thử
CDE và phiên bản	Tài liệu có quy tắc vùng dữ liệu, bản ghi giao nộp và minh họa Trimble Connect	Kiểm toán độc lập lịch sử phê duyệt và tính hợp lệ theo mục đích
Mô hình bộ môn, IFC	Báo cáo Tuyên Sơn nêu mô hình gốc và IFC 4.0 của các bộ môn	Kiểm thử thuộc tính, GUID, Qto và đơn vị bằng phần mềm độc lập
Va chạm liên ngành	Các ma trận và bảng kết quả kiểm tra theo cặp mô hình	Phân biệt phát hiện thô, issue có xác nhận và tỷ lệ đã đóng
Khối lượng, bản vẽ	Báo cáo có thống kê 68.397 cấu kiện khối đế và mục xuất bản vẽ 2D	Đối soát mẫu với tiên lượng và bản vẽ theo cùng phiên bản
Đánh giá hiệu quả	Có kết quả triển khai và bàn giao theo báo cáo đơn vị thực hiện	Chưa có thiết kế thử nghiệm đối chứng, thời gian/chi phí trước-sau

6.4. Quy trình thí điểm đề nghị để kiểm chứng khung

Để kiểm chứng đầy đủ, chọn một gói TKKT hoặc TKBVTC có ít nhất hai bộ môn giao cắt và một nhóm cấu kiện liên kết khối lượng.

Chốt EIR/BEP, danh mục mã cấu kiện, yêu cầu kiểm tra và phiên bản IFC; sau đó thực hiện chu trình hai lần tại các mốc bản dự thảo và bản phát hành. Lưu dữ liệu gốc và log: tổng số trường thuộc tính phải kiểm/số hợp lệ, số issue C1-C3 trước và sau, tỷ lệ vấn đề đóng, sai khác Qto–tiên lượng, số cặp hồ sơ đồng bộ, thời gian xử lý và số vòng phát hành. Công bố kết quả cùng bộ mẫu và phạm vi loại trừ; chỉ khi có dữ liệu đối chứng phù hợp mới đánh giá mức cải thiện định lượng.

7. KẾT LUẬN

Nghiên cứu xây dựng khung tổ chức và quản lý thông tin BIM cho TKKT/TKBVTC theo chuỗi truy vết từ EIR–BEP–MIDP/TIDP đến cấu trúc IFC/Pset/Qto, quy tắc kiểm tra, cổng chấp thuận và hồ sơ phát hành. Điểm bổ sung so với hướng dẫn nguyên tắc là việc cụ thể hóa trách nhiệm, bộ chỉ số đo lường, bảng đối soát mô hình–bản vẽ–dự toán và điều kiện kiểm soát thay đổi theo phiên bản.

Các tài liệu thực tiễn về quản lý CDE và triển khai BIM trong công trình cao tầng ở Việt Nam cho thấy có thể thu thập những dữ liệu đầu vào cần thiết, nhưng chưa chứng minh được hiệu quả của toàn bộ khung đề xuất. Khả năng áp dụng cần được kiểm tra trên gói thiết kế có từ hai bộ môn, với dữ liệu xuất-nhập IFC độc lập, nhật ký vấn đề và chỉ tiêu trước-sau. Chủ đầu tư và tư vấn nên tích hợp bộ tiêu chí này vào EIR/BEP theo hợp đồng, đồng thời bảo đảm việc phát hành và phê duyệt thiết kế tuân thủ pháp luật hiện hành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Xây dựng số 50/2014/QH13 ngày 18/6/2014 (đối chiếu pháp lý lịch sử), 2014.

[2] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10/12/2025, có hiệu lực cơ bản từ 01/7/2026.

[3] Chính phủ. Nghị định số 217/2026/NĐ-CP ngày 19/6/2026 quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng về quản lý hoạt động xây dựng, 2026.

[4] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 258/QĐ-TTg ngày 17/3/2023 phê duyệt lộ trình áp dụng BIM trong hoạt động xây dựng, 2023.

[5] Bộ Xây dựng. Quyết định số 348/QĐ-BXD ngày 02/4/2021 công bố Hướng dẫn chung áp dụng BIM, 2021.

6] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 14177-1:2024. Quản lý thông tin sử dụng BIM - Phần 1: Khái niệm và nguyên tắc, 2024.

[7] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 14177-2:2024. Quản lý thông tin sử dụng BIM - Phần 2: Giai đoạn chuyển giao tài sản, 2024.

[8] ISO. ISO 19650-1:2018 và ISO 19650-2:2018. Information management using building information modelling, 2018.

[9] ISO. ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in construction and facility management, 2024.

[10] BuildingSMART International. IFC4.3.2.0 documentation. Internet: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/HTML/ (accessed: 7/2026).

[11] ISO. ISO 19650-4:2022. Information exchange, 2022.

[12] ISO. ISO 29481-1:2016. Building information models - Information delivery manual - Part 1, 2016.

[13] buildingSMART International. Information Delivery Specification (IDS), version 1.0, 2024. Internet: https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/ (accessed: 7/2026).

[14] ISO. ISO 12006-2:2015. Framework for classification, 2015.

[15] H Liu, JCP Cheng, VJL Gan and S Zhou. A novel data-driven framework based on BIM and knowledge graph for automatic model auditing and quantity take-off. Advanced Engineering Informatics, vol. 54, 101757, 2022, doi: 10.1016/j.aei.2022.101757.

16] K Jaskula, D Kifokeris, E Papadonikolaki and D Rovas. Common data environments in construction: State-of-the-art and challenges for practical implementation. Construction Innovation, 2024, doi: 10.1108/CI-04-2023-0088.

[17] Z Ma, H Zhu, X Xiang, Ž Turk and R Klinc. Automatic compliance checking of BIM models against quality standards based on ontology technology. Automation in Construction, 105656, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105656.

[18] M Valinejadshoubi, O Moselhi, I Iordanova, F Valdivieso and A Bagchi. Automated system for high-accuracy quantity takeoff using BIM. Automation in Construction, vol. 157, 105155, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105155.

[19] Tạ Ngọc Bình và cộng sự. Nghiên cứu đề xuất hướng dẫn ứng dụng BIM hỗ trợ thẩm định và cấp phép xây dựng tại Việt Nam. Tạp chí Kinh tế xây dựng, vol. 14, no. 4, 2025. Internets: https://vjol.info.vn/tapchikinhtexaydung/en/article/view/136220/ (truy cập: tháng 7/2026)

[20] Nguyễn Anh Thư và Phạm Thành Nhân. Xây dựng quy trình triển khai BIM theo ISO 19650 cho doanh nghiệp xây dựng. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, vol. 16, no. 1, 2026. Internet: https://vjol.info.vn/tcvienvatlieu/en/article/view/136902/ (truy cập: tháng 7/2026)

[21] Viện Kỹ thuật Công trình. Kế hoạch áp dụng BIM (BEP), dự án Khu nhà ở và dịch vụ Tuyên Sơn, 2026.

[22] Viện Kỹ thuật Công trình. Báo cáo kết quả áp dụng BIM, dự án Khu nhà ở và dịch vụ Tuyên Sơn, 2026.

■ Ngày nộp bài: 28/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 09/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/10/2026

Nghiên cứu tổ chức làn ưu tiên cho xe buýt kết nối với hệ thống metro tại TP Hồ Chí Minh

Study on priority bus lane organization for integration with the metro system in Ho Chi Minh City

> THS PHẠM PHƯƠNG NAM*, THS HUỲNH NGỌC VÂN, THS HUỲNH THỊ ÁNH TUYẾT
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
*Email: phuongnam.pham@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích thực trạng tổ chức giao thông và bố trí làn xe buýt trên một số tuyến đường chính tại TP Hồ Chí Minh (TP.HCM), tập trung vào các xung đột giao thông, khả năng tiếp cận trạm dừng và những yếu tố ảnh hưởng đến điều kiện vận hành của xe buýt. Trên cơ sở đặc điểm mặt cắt ngang đường và kết quả mô phỏng giao thông, nghiên cứu đề xuất phương án bố trí làn ưu tiên phù hợp cho hai dạng tuyến điển hình. Đối với đường một chiều có 3 làn xe, làn ưu tiên nên bố trí ở làn ngoài cùng bên trái; đối với đường hai chiều có từ 2 làn xe mỗi chiều, làn ưu tiên nên bố trí giáp tim đường. Đồng thời, nghiên cứu đề xuất định hướng tổ chức các hành lang xe buýt ưu tiên nhằm tăng cường kết nối với hệ thống metro và nâng cao hiệu quả vận tải hành khách công cộng.

Từ khóa: Giao thông đô thị; làn ưu tiên xe buýt; metro; kết nối vận tải công cộng; giao thông công cộng; TP Hồ Chí Minh.

ABSTRACT

This paper analyzes the current traffic organization and bus lane arrangements on several major roads in Ho Chi Minh City, with a focus on traffic conflicts, accessibility to bus stops and factors affecting bus operating conditions. Based on roadway cross-section characteristics and traffic simulation results, the study proposes appropriate priority bus lane arrangements for two typical road configurations. For one-way roads with three traffic lanes, the priority bus lane should be located in the far-left lane; for two-way roads with at least two lanes in each direction, the priority bus lane should be located adjacent to the roadway centerline. In addition, the study proposes an organizational orientation for priority bus corridors to strengthen connectivity with the metro system and improve the overall efficiency of public passenger transport.

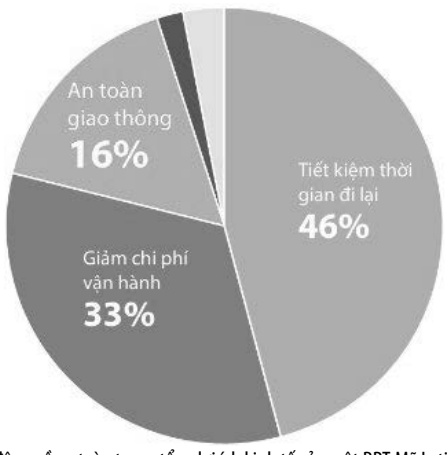
Keywords: Urban transport; priority bus lane; metro; public transport integration; public transportation; Ho Chi Minh City.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TP.HCM đang chịu áp lực giao thông lớn do đô thị hóa nhanh, gia tăng dân số và nhu cầu đi lại cao. Tỷ lệ sử dụng xe buýt còn khiêm tốn, một phần do tốc độ khai thác thấp và thời gian hành trình chưa ổn định [1]. Vì vậy, nâng cao sức hấp dẫn của vận tải công cộng là cần thiết để giảm ùn tắc, ô nhiễm và áp lực lên hạ tầng đường bộ.

Một trong những giải pháp cải thiện chất lượng phục vụ xe buýt là tổ chức làn ưu tiên hoặc làn dành riêng. Việc tách một phần dòng xe buýt khỏi giao thông hỗn hợp có thể nâng cao tốc độ khai thác và tăng tính đúng giờ. Kinh nghiệm triển khai cho thấy hệ thống ưu tiên xe buýt mang lại lợi ích về thời gian, chi phí vận hành và an toàn giao thông [2].

Hiệu quả của làn ưu tiên phụ thuộc vào tổ chức giao thông, mặt cắt đường, thành phần dòng xe, vị trí trạm dừng và phương thức tiếp cận hành khách. Với TP.HCM, nơi xe máy chiếm tỷ lệ lớn, vị trí làn và tổ chức đón, trả khách cần được xem xét đồng bộ để hạn chế xung đột.



Hình 1. Tác động về an toàn trong tổng lợi ích kinh tế của một BRT Mỹ Latinh điển hình

Tại Việt Nam, hình thức ưu tiên xe buýt đã được triển khai ở Hà Nội và TP.HCM. Tuyến BRT Kim Mã - Yên Nghĩa tại Hà Nội được tổ

chức với làn riêng gần dải phân cách giữa, kết hợp nhà chờ và ưu tiên nút giao.



Hình 2. Hình ảnh tuyến buýt nhanh BRT 01 Kim Mã - Yên Nghĩa

Tại TP.HCM, làn ưu tiên xe buýt từng được thí điểm trên đường Trần Hưng Đạo. Kết quả bước đầu cho thấy xe buýt vận hành ổn định hơn, nhưng phương án phải dừng do ảnh hưởng đến hoạt động tiếp cận và sinh hoạt dọc tuyến [1]. Điều này cho thấy làn ưu tiên phải đồng thời xét đến mặt cắt đường, nhu cầu tiếp cận hai bên và tổ chức giao thông.



Hình 3. Hình ảnh làn dành riêng cho xe buýt trên hành lang đường Trần Hưng Đạo

Sự hình thành hệ thống đường sắt đô thị đặt ra yêu cầu mới đối với vận tải hành khách công cộng TP.HCM. Metro số 1 Bến Thành - Suối Tiên được đưa vào vận hành làm rõ nhu cầu kết nối giữa metro và giao thông công cộng mặt đất. Metro đảm nhận hành trình chính, còn xe buýt thu gom và phân phối hành khách đến, đi từ các ga. Vì vậy, tính ổn định của hành trình xe buýt và điều kiện chuyển tuyến với metro có ý nghĩa quan trọng.

Trong phạm vi bài báo, nhóm tác giả phân tích hiện trạng và bất cập trong bố trí làn xe buýt trên một số tuyến đường chính; xem xét phương án làn ưu tiên cho đường một chiều có 3 làn xe và đường hai chiều có từ 2 làn xe trở lên cho mỗi chiều. Trên cơ sở phân tích và mô phỏng giao thông, nghiên cứu đề xuất vị trí làn phù hợp, đồng thời định hướng các hành lang xe buýt ưu tiên kết nối metro.

2. THỰC TRẠNG BỐ TRÍ LÀN XE BUÝT TRÊN MỘT SỐ TUYẾN ĐƯỜNG ĐIỂN HÌNH CỦA TP.HCM

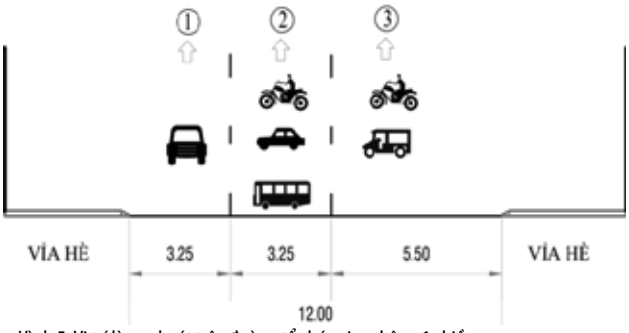
Hiện nay, tại TP.HCM, xe buýt vẫn lưu thông chung với các phương tiện khác. Trong điều kiện tỷ lệ xe máy cao, xe buýt thường xuyên phải chuyển làn để tiếp cận trạm dừng, làm phát sinh xung đột, ảnh hưởng đến tốc độ khai thác, tính ổn định hành trình và an toàn giao thông. Nghiên cứu xem xét hai dạng mặt cắt điển hình: Đường một chiều có 3 làn xe và đường hai chiều có từ 2 làn xe trở lên cho mỗi chiều.

2.1. Đường một chiều có 3 làn xe

Đối với đường một chiều có 3 làn xe, xe buýt thường lưu thông ở làn giữa, trong khi trạm dừng và nhà chờ bố trí trên vỉa hè bên phải. Khi đón, trả khách, xe buýt phải chuyển sang làn sát vỉa hè rồi nhập trở lại dòng giao thông, tạo điểm giao cắt với các phương tiện khác, làm giảm khả năng thông hành và an toàn.



Hình 4. Hình ảnh xe buýt trên đường tổ chức giao thông 1 chiều



Hình 5. Vị trí làn xe buýt trên đường tổ chức giao thông 1 chiều

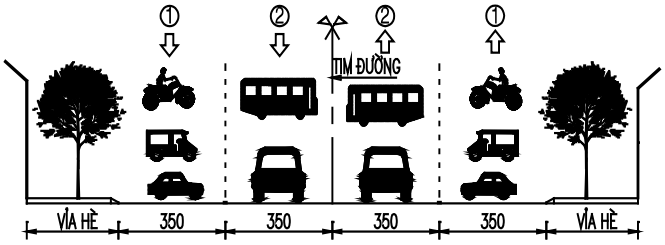
Các làn gồm: Làn số 1 ngoài cùng bên trái, rộng khoảng 3,25 m, dành cho ô tô; làn số 2 ở giữa, rộng khoảng 3,25 m, dành cho xe mô tô, ô tô con, ô tô khách và xe buýt; làn số 3 ngoài cùng bên phải, rộng khoảng 5,50 m, dành cho xe hai bánh và ba bánh. Cách tổ chức này làm phát sinh xung đột khi xe buýt tiếp cận trạm dừng, nhà chờ bố trí trên vỉa hè.

2.2. Đường hai chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên

Đối với đường hai chiều, xe buýt thường lưu thông ở làn gần tim đường, trong khi trạm dừng và nhà chờ bố trí trên vỉa hè bên phải. Khi tiếp cận trạm, xe buýt phải cắt qua dòng phương tiện ở làn ngoài để đón, trả khách rồi nhập trở lại dòng xe, làm gia tăng xung đột.



Hình 6. Hình ảnh xe buýt trên đường tổ chức giao thông 2 chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên



Hình 7. Vị trí làn xe buýt trên đường tổ chức giao thông 2 chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên

Theo một chiều lưu thông, làn số 1 ngoài cùng bên phải, rộng khoảng 3,50 m, dành cho xe hai bánh và ba bánh; làn số 2 tiếp giáp tim đường, rộng khoảng 3,50 m, dành cho ô tô con, ô tô khách, xe buýt và các phương tiện khác. Bất lợi chính là vị trí lưu thông của xe buýt và vị trí đón, trả khách không cùng hành lang, buộc xe buýt phải cắt qua dòng xe phía ngoài để tiếp cận trạm.

2.3. Những bất lợi cơ bản trong tổ chức làn xe buýt hiện nay

Qua phân tích hai dạng mặt cắt, có thể nhận thấy ba bất lợi chính. Thứ nhất, xe buýt lưu thông chung với nhiều loại phương tiện có đặc tính vận hành khác nhau, làm giảm tính ổn định của hành trình, nhất là trong giờ cao điểm. Thứ hai, vị trí làn xe buýt và trạm dừng chưa đồng bộ, khiến xe buýt phải cắt qua dòng phương tiện, chủ yếu là xe máy ở làn sát vỉa hè, làm tăng xung đột và giảm khả năng thông hành. Thứ ba, việc chuyển làn tại trạm dừng làm tăng thời gian trễ, giảm tốc độ khai thác và ảnh hưởng đến biểu đồ chạy xe.

Những bất lợi trên làm giảm chất lượng dịch vụ xe buýt và hạn chế khả năng tổ chức hành trình liên phương thức. Trong bối cảnh metro từng bước phát triển, tính ổn định hành trình, vị trí trạm dừng và điều kiện tiếp cận trở thành các yếu tố quan trọng để xe buýt thực hiện vai trò thu gom, phân phối hành khách cho các ga metro. Vì vậy, bố trí làn ưu tiên cần hướng đồng thời đến giảm xung đột giao thông và nâng cao khả năng kết nối trong mạng lưới vận tải hành khách công cộng.

3. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP BỐ TRÍ LÀN ƯU TIÊN CHO XE BUÝT VÀ ĐỊNH HƯỚNG KẾT NỐI METRO

Trong điều kiện hạ tầng giao thông TP.HCM còn hạn chế và phương tiện cá nhân chiếm tỷ lệ lớn, việc dành một phần mặt cắt ngang cho xe buýt có thể làm giảm năng lực các làn còn lại. Vì vậy, làn ưu tiên cần phù hợp với mặt cắt, thành phần dòng xe, vị trí trạm dừng và điều kiện tiếp cận; mục tiêu là nâng cao tốc độ, tính ổn định của xe buýt, giảm xung đột và hạn chế ảnh hưởng đến giao thông hiện hữu. Hai dạng mặt cắt điển hình được lựa chọn như đã phân tích tại Mục 2.

3.1. Giải pháp bố trí làn ưu tiên trên đường một chiều có 3 làn xe

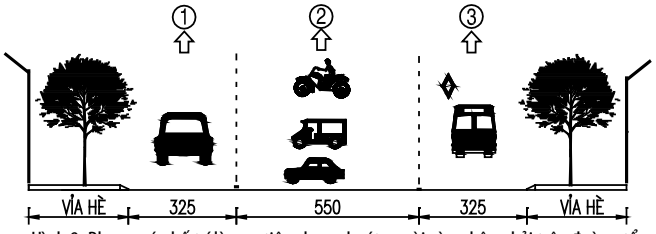
3.1.1. Làn ưu tiên bố trí ngoài cùng bên phải

Với phương án này, làn ưu tiên cho xe buýt được bố trí sát vỉa hè bên phải tuyến đường. Phương án tổ chức gồm:

- Làn số 1, ngoài cùng bên trái: Dành cho ô tô;
- Làn số 2, ở giữa: Dành cho các phương tiện còn lại;
- Làn số 3, ngoài cùng bên phải: Làn ưu tiên cho xe buýt.

Ưu điểm của phương án là xe buýt có thể tiếp cận trực tiếp trạm dừng trên vỉa hè, không phải chuyển làn khi đón, trả khách; hành khách cũng dễ dàng tiếp cận xe buýt từ phía vỉa hè.

Tuy nhiên, làn ưu tiên sát vỉa hè có thể ảnh hưởng đáng kể đến hoạt động tiếp cận nhà ở, cơ sở kinh doanh và các tuyến đường nhánh phía bên phải. Các phương tiện ra, vào khu vực hai bên đường phải cắt qua làn ưu tiên, làm phát sinh xung đột và ảnh hưởng đến tính liên tục của dòng xe buýt.



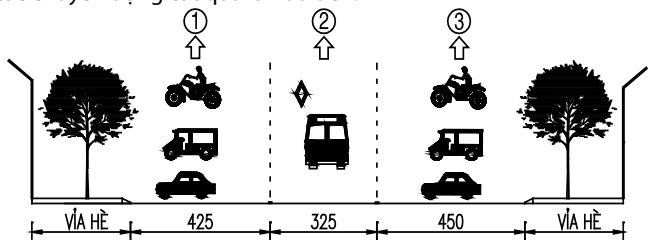
Hình 8. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt ngoài cùng bên phải trên đường tổ chức giao thông 1 chiều có 3 làn xe

3.1.2. Làn ưu tiên bố trí ở giữa

Trong phương án này, làn giữa được dành ưu tiên cho xe buýt. Các làn được tổ chức như sau:

- Làn số 1, ngoài cùng bên trái: Dành cho các phương tiện đi thẳng và rẽ trái;
- Làn số 2, ở giữa: Làn ưu tiên cho xe buýt;
- Làn số 3, ngoài cùng bên phải: Dành cho các phương tiện đi thẳng và rẽ phải.

Phương án này ít ảnh hưởng đến hoạt động tiếp cận hai bên tuyến và không làm thay đổi lớn cấu trúc dòng giao thông hiện hữu. Tuy nhiên, xe buýt vẫn phát sinh xung đột với các dòng rẽ tại nút giao và gặp khó khăn khi tiếp cận trạm dừng bố trí trên vỉa hè. Vì vậy, nếu áp dụng cần tổ chức lại vị trí đón, trả khách và kiểm soát các chuyển động cắt qua làn ưu tiên.



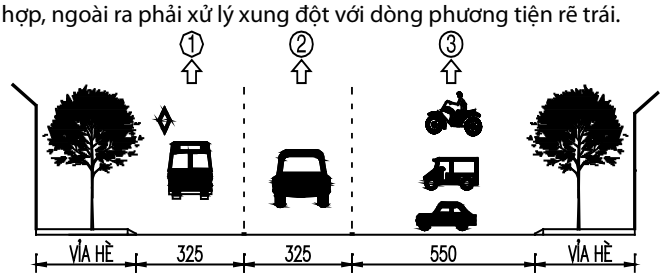
Hình 9. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt ở giữa trên đường tổ chức giao thông 1 chiều có 3 làn xe

3.1.3. Làn ưu tiên bố trí ngoài cùng bên trái, lưu thông cùng chiều

Theo phương án này, làn ngoài cùng bên trái được dành cho xe buýt và lưu thông cùng chiều với các phương tiện còn lại. Cấu trúc mặt cắt gồm:

- Làn số 1, ngoài cùng bên trái: Làn ưu tiên cho xe buýt;
- Làn số 2, ở giữa: Dành cho ô tô;
- Làn số 3, ngoài cùng bên phải: Dành cho các phương tiện còn lại.

Ưu điểm của phương án là hạn chế ảnh hưởng đến dòng xe rẽ phải và các hoạt động tiếp cận phía bên phải tuyến. Đồng thời, làn xe buýt được tách tương đối rõ khỏi dòng xe máy tập trung ở khu vực sát vỉa hè. Nhược điểm chủ yếu là xe buýt hiện nay có cửa lên, xuống bên phải nên việc bố trí trạm dừng cần được điều chỉnh phù hợp, ngoài ra phải xử lý xung đột với dòng phương tiện rẽ trái.



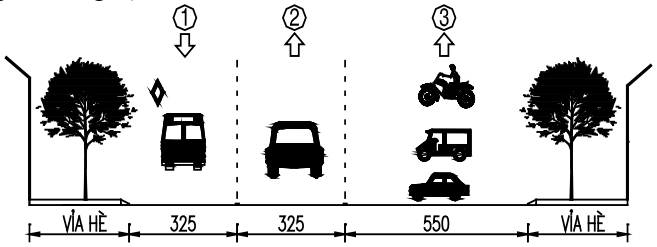
Hình 10. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt ngoài cùng bên trái lưu thông cùng chiều trên đường tổ chức giao thông 1 chiều có 3 làn xe

3.1.4. Làn ưu tiên bố trí ngoài cùng bên trái, lưu thông ngược chiều

Phương án này tổ chức làn ưu tiên xe buýt ở ngoài cùng bên trái nhưng lưu thông ngược chiều với các làn xe còn lại. Các làn được bố trí gồm:

- Làn số 1, ngoài cùng bên trái: Làn ưu tiên cho xe buýt lưu thông ngược chiều;
- Làn số 2, ở giữa: Dành cho ô tô;
- Làn số 3, ngoài cùng bên phải: Dành cho các phương tiện còn lại.

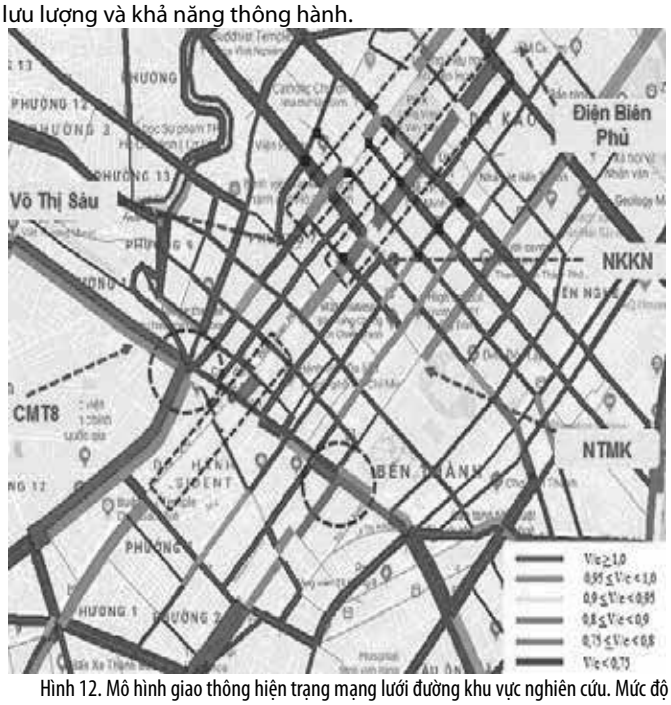
Phương án tạo mức độ ưu tiên rõ rệt và tách biệt xe buýt khỏi dòng giao thông cùng chiều. Tuy nhiên, việc tổ chức dòng xe ngược chiều làm tăng yêu cầu về phân cách, tổ chức nút giao và an toàn giao thông. Đồng thời, cần bố trí lại trạm dừng, nhà chờ và mạng lưới tuyến phù hợp với hướng tiếp cận của hành khách. Do đó, phương án này chỉ phù hợp trong những điều kiện tổ chức giao thông đặc thù.



Hình 11. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt ngoài cùng bên trái lưu thông ngược chiều với các làn xe còn lại trên đường có 3 làn xe

3.1.5. Đề xuất vị trí làn ưu tiên trên đường một chiều có 3 làn xe

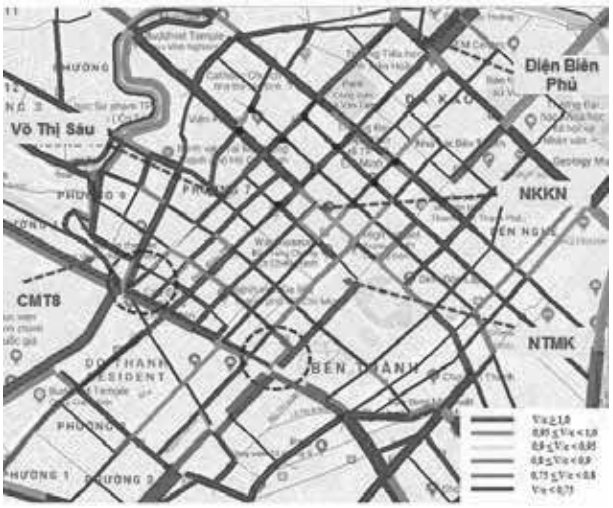
Để lựa chọn phương án phù hợp, nghiên cứu đã xây dựng mô hình giao thông hiện trạng cho khu vực gồm một số tuyến chính như Võ Thị Sáu, Điện Biên Phủ, Nam Kỳ Khởi Nghĩa và Nguyễn Thị Minh Khai. Mức độ ùn tắc được đánh giá thông qua tỷ số V/C giữa lưu lượng và khả năng thông hành.



Hình 12. Mô hình giao thông hiện trạng mạng lưới đường khu vực nghiên cứu. Mức độ ùn tắc V/C (lưu lượng/khả năng thông hành)

Trên cơ sở dữ liệu giao thông, kinh tế - xã hội và các phương án tổ chức có thể áp dụng, nghiên cứu tiến hành mô phỏng để đánh giá tác động của việc bố trí làn ưu tiên đối với giao thông trên tuyến và mạng lưới khu vực.

Kết quả phân tích cho thấy phương án bố trí làn ưu tiên ở ngoài cùng bên trái và lưu thông cùng chiều có tính phù hợp cao hơn đối với dạng đường một chiều có 3 làn xe. Phương án giúp giảm sự can thiệp giữa xe buýt với dòng xe máy sát vỉa hè, đồng thời hạn chế ảnh hưởng đến hoạt động tiếp cận phía bên phải tuyến.



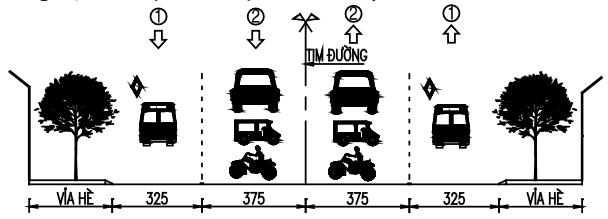
Hình 13. Mô hình giao thông mạng lưới đường khu vực nghiên cứu với phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt ngoài cùng bên trái trên đường Võ Thị Sáu. Mức độ ùn tắc V/C (lưu lượng/khả năng thông hành)

Để tăng tính linh hoạt trong vận hành, có thể xem xét sử dụng xe buýt có cửa lên, xuống phù hợp với cả hai phía hoặc bố trí giải pháp nhà chờ, đảo đón khách tương ứng với điều kiện thực tế. Việc tổ chức cụ thể cần đồng thời xét đến dòng xe rẽ trái, vị trí nút giao và yêu cầu an toàn của hành khách.

3.2. Giải pháp bố trí làn ưu tiên trên đường hai chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên

3.2.1. Làn ưu tiên bố trí bên phải, giáp vỉa hè

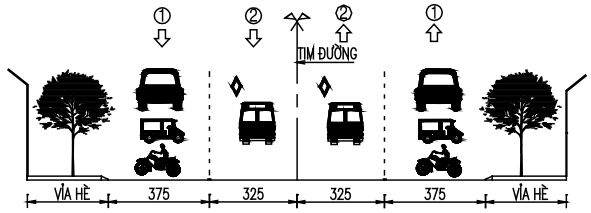
Theo một chiều lưu thông, làn số 1 ngoài cùng bên phải dành ưu tiên cho xe buýt; làn số 2 giáp tim đường dành cho các phương tiện còn lại. Ưu điểm là xe buýt tiếp cận trực tiếp trạm dừng trên vỉa hè, hạn chế chuyển làn khi đón, trả khách. Tuy nhiên, phương án làm giảm không gian của dòng hỗn hợp và ảnh hưởng đến tiếp cận các công trình hai bên tuyến; tại đường nhánh và vị trí ra, vào công trình, phương tiện khác phải cắt qua làn xe buýt.



Hình 14. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt bên phải trên tuyến đường lưu thông 2 chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên

3.2.2. Làn ưu tiên bố trí giáp tim đường

Theo một chiều lưu thông, làn số 1 ngoài cùng bên phải dành cho các phương tiện còn lại; làn số 2 giáp tim đường dành ưu tiên cho xe buýt. Phương án hạn chế ảnh hưởng đến hoạt động hai bên tuyến và tách xe buýt khỏi phần lớn dòng xe máy sát vỉa hè. Tuy nhiên, nếu trạm dừng vẫn ở bên phải, xe buýt phải cắt qua làn hỗn hợp để đón, trả khách.



Hình 15. Phương án bố trí làn ưu tiên cho xe buýt giáp tim đường, tuyến đường lưu thông 2 chiều, mỗi chiều có từ 2 làn xe trở lên

Để khắc phục, có thể bố trí trạm dừng trên dải phân cách giữa hoặc đảo đón khách. Khi đó, cần tổ chức lối tiếp cận an toàn bằng vạch qua đường, biển báo, đèn tín hiệu và giải pháp giảm tốc; tại nút giao có đèn tín hiệu có thể phối hợp pha đi bộ với vị trí trạm dừng.

3.2.3. Đề xuất vị trí làn ưu tiên trên đường hai chiều

Trên cơ sở phân tích ưu, nhược điểm, nghiên cứu đề xuất bố trí làn ưu tiên ở vị trí giáp tim đường đối với đường hai chiều có từ 2 làn xe trở lên cho mỗi chiều. Vị trí này giúp hạn chế xung đột giữa xe buýt với dòng xe máy sát vỉa hè và giảm ảnh hưởng đến tiếp cận hai bên tuyến. Giải pháp cần kết hợp với trạm dừng trên dải phân cách hoặc đảo đón khách và tổ chức lối đi bộ an toàn.

3.3. Các giải pháp hỗ trợ tổ chức và tiếp cận làn ưu tiên xe buýt

Hiệu quả của làn ưu tiên xe buýt phụ thuộc vào việc triển khai đồng bộ các giải pháp về nhận diện làn, trạm dừng, quản lý vận hành và tiếp cận hành khách. Một số giải pháp cần xem xét như sau:

- Vạch sơn và báo hiệu làn: Bố trí vạch phân cách, vạch dừng xe buýt, vạch giảm tốc và ký hiệu nhận biết nhằm định hướng dòng giao thông, hạn chế phương tiện không được phép đi vào làn ưu tiên.

- Biển báo, biển thông tin và thiết bị phân luồng: Tổ chức tại các đoạn chuyển tiếp, nút giao và khu vực trạm dừng để người tham gia giao thông nhận biết rõ chức năng làn và xử lý phù hợp.

- Trạm dừng và nhà chờ: Bố trí phù hợp với vị trí làn ưu tiên, hạn chế chuyển làn không cần thiết.

- Camera giám sát: Hỗ trợ kiểm soát việc sử dụng làn đúng chức năng, đồng thời cung cấp dữ liệu phục vụ quản lý giao thông và điều hành xe buýt.

- Tổ chức lối tiếp cận: Với trạm dừng trên dải phân cách hoặc đảo đón khách, cần bố trí lối đi bộ an toàn bằng vạch qua đường, đèn tín hiệu, biển cảnh báo và giải pháp giảm tốc phù hợp.

- Bãi đỗ xe máy và kết nối phương thức: Có thể bố trí gần trạm xe buýt hoặc đầu mối trung chuyển để hỗ trợ hành khách kết hợp phương tiện cá nhân với giao thông công cộng.

Đối với các hành lang kết nối metro, trạm xe buýt cần ưu tiên bố trí gần lối ra, vào ga, giảm khoảng cách đi bộ và số lần băng qua dòng xe.

3.4. Định hướng tổ chức các hành lang xe buýt ưu tiên kết nối với hệ thống metro

Trong mạng lưới vận tải công cộng, metro đảm nhận các hành lang chính, còn xe buýt thu gom và phân phối hành khách đến, đi từ ga. Vì vậy, làn ưu tiên xe buýt cần được xem xét trong mối quan hệ với mạng lưới metro thay vì như giải pháp độc lập trên từng tuyến.

Không nhất thiết mọi tuyến xe buýt đều bố trí làn ưu tiên. Nên tập trung vào hành lang kết nối trực tiếp ga metro, có nhu cầu lớn, thường xuyên ùn tắc và mặt cắt phù hợp nhằm nâng cao tính ổn định hành trình và hỗ trợ chuyển tuyến.

Các kết quả nghiên cứu về mặt cắt có thể làm cơ sở tham khảo cho tổ chức hành lang kết nối: đường một chiều có 3 làn xe ưu tiên xem xét làn ngoài cùng bên trái; đường hai chiều có từ 2 làn mỗi chiều có thể bố trí làn giáp tim. Tại khu vực ga metro, vị trí làn cần được xem xét đồng thời với cửa ga, trạm dừng xe buýt, tổ chức người đi bộ và không gian trung chuyển.

Về nguyên tắc, có thể tổ chức theo mô hình "xe buýt - metro". Xe buýt đưa khách từ khu dân cư, khu vực trường học, văn phòng hoặc đầu mối giao thông đến ga; metro đảm nhận hành trình chính; sau đó hành khách tiếp tục bằng xe buýt hoặc phương thức khác. Làn ưu tiên giúp ổn định thời gian tiếp cận metro và tăng tính liên thông của mạng lưới vận tải công cộng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích các bất cập trong tổ chức xe buýt trên một số tuyến đường chính tại TP.HCM, đặc biệt là xung đột phát sinh do vị trí làn lưu thông của xe buýt chưa phù hợp với vị trí trạm dừng và dòng giao thông hỗn hợp. Những bất cập này làm giảm tính ổn định của hành trình, ảnh hưởng đến khả năng thông hành và an toàn giao thông.

Trên cơ sở phân tích đặc điểm mặt cắt và kết quả mô phỏng giao thông, nghiên cứu đề xuất phương án bố trí làn ưu tiên phù hợp cho hai dạng tuyến điển hình. Đối với đường một chiều có 3 làn xe, làn ưu tiên nên bố trí ở ngoài cùng bên trái; đối với đường hai chiều có từ 2 làn xe trở lên cho mỗi chiều, làn ưu tiên nên bố trí giáp tim đường. Các giải pháp này cần được triển khai đồng bộ với tổ chức trạm dừng, lối tiếp cận hành khách, báo hiệu giao thông và các biện pháp bảo đảm an toàn.

Trong bối cảnh hệ thống metro TP.HCM từng bước phát triển, kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng làm cơ sở tham khảo cho việc tổ chức các hành lang xe buýt ưu tiên kết nối với các ga metro. Xe buýt có thể đảm nhận chức năng gom và phân phối hành khách, trong khi làn ưu tiên góp phần nâng cao tính ổn định của thời gian hành trình và hỗ trợ quá trình chuyển tuyến. Qua đó, việc phối hợp giữa xe buýt và metro có thể góp phần tăng cường tính liên thông và nâng cao hiệu quả chung của mạng lưới vận tải hành khách công cộng TP.HCM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Dự án Tổ chức làn đường ưu tiên cho xe buýt trên đường Điện Biên Phủ và đường Võ Thị Sáu, Quận 1, 3 - TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam, 2023.

[2] World Resources Institute. An toàn giao thông trong các hệ thống ưu tiên xe buýt, 2014.

[3] Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia các công trình hạ tầng kỹ thuật. QCVN 07:2023, 2023.

[4] Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ. QCVN 41:2024/BGTVT, 2024.

[5] Đường đô thị - Yêu cầu thiết kế. TCVN 13592-2022, 2022.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 13/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Tối ưu hóa điều phối nguồn lực chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng: Đánh giá hiệu quả các phương pháp trong bài toán vận tải tuyến tính

Optimizing resource allocation in construction material supply chains: An efficiency evaluation of linear transportation problem methods

> BÙI VĂN TUYÊN
Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ Văn Lang, Trường Đại học Văn Lang
Email: tuyen.bv@vlu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài nghiên cứu tập trung giải quyết bài toán tối ưu hóa nguồn lực thông qua mô hình vận tải thuộc lĩnh vực quy hoạch tuyến tính. Mục tiêu nghiên cứu là xác định phương án phân bổ tối ưu khối lượng vật liệu nhà cung cấp đến đơn vị tiêu thụ nhằm giảm thiểu tổng chi phí vận chuyển, đồng thời đảm bảo các ràng buộc về khả năng cung ứng và nhu cầu tiêu thụ. Nghiên cứu tiến hành đánh giá thực nghiệm tính hiệu quả của ba thuật toán tìm kiếm phương án cơ sở ban đầu: phương pháp Góc Tây Bắc, phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất và phương pháp Ưu tiên kép. Kết quả phân tích định lượng cho thấy phương pháp Ưu tiên kép cung cấp lời giải tiệm cận tối ưu nhất với chi phí vận chuyển đạt mức 11510 đơn vị, thấp hơn 2.78% so với phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất (11830 đơn vị) và đặc biệt thấp hơn 26.59% so với phương pháp Góc Tây Bắc (14570 đơn vị). Các kết quả thu được khẳng định vai trò cốt yếu của việc ứng dụng các thuật toán quy hoạch tuyến tính trong việc nâng cao hiệu quả quản trị chuỗi cung ứng. Việc lựa chọn thuật toán phù hợp không chỉ giúp tối ưu hóa chi phí vận hành mà còn cung cấp cơ sở dữ liệu khoa học cho các quyết định chiến lược trong quản lý nguồn lực ngành xây dựng.

Từ khóa: Bài toán vận tải; quy hoạch tuyến tính; tối ưu hóa chi phí; quản trị chuỗi cung ứng.

ABSTRACT

The study focuses on solving resource optimization problems through the transportation model within the field of linear programming. The objective of research is to determine the optimal allocation plan for material quantities from suppliers to consumer units to minimize total transportation costs, while ensuring constraints on supply capacity and consumer demand. The study conducts an empirical evaluation of the effectiveness of three algorithms for finding the initial basic feasible solution: the North-West Corner method, the Least Cost method, and the Double Preference method. Quantitative analysis results show that the Double Preference method provides the most near-optimal solution with a transportation cost of 11510 units, which is 2.78% lower than the Least Cost method (11830 units) and significantly lower by 26.59% compared to the North-West Corner method (14570 units). The obtained results confirm the crucial role of applying linear programming algorithms in enhancing supply chain management efficiency. Choosing the appropriate algorithm not only helps optimize operating costs but also provides a scientific database for strategic decisions in construction resource management.

Keywords: Transportation problem; linear programming; cost optimization; supply chain management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh ngành Xây dựng hiện đại, việc quản lý hiệu quả chuỗi cung ứng vật liệu đóng vai trò quyết định đến sự thành công của các dự án. Khi quy mô và tính phức tạp của các công trình ngày càng gia tăng, việc phân bổ chiến lược các nguồn lực từ nhiều nhà cung cấp đến các địa điểm thi công trở nên thách thức hơn bao giờ hết. Những bất cập trong công tác logistics không chỉ làm gia tăng chi phí vận hành mà còn gây chậm trễ tiến độ, trực tiếp ảnh hưởng đến tính khả thi và lợi nhuận của toàn bộ dự án. Việc lập kế hoạch vận chuyển cần xem xét đồng thời chi phí vận tải, năng lực cung ứng và yêu cầu phân phối tại các địa điểm tiếp nhận. Nghiên cứu của Tô Thị Hương Quỳnh và Nguyễn Phương Châm về chiến lược quản trị logistics trong xây dựng tiền chế [1] đã đề cập đến vai trò của việc hoàn thiện hoạt động logistics đối với tối ưu hóa chi phí, tiến độ và chất lượng thi công. Bên cạnh đó, Yi và cộng sự trong [2] đã xây dựng mô hình quy hoạch toán học nhằm tối ưu hóa kế hoạch

vận chuyển cấu kiện đúc sẵn trong xây dựng, qua đó cho thấy tiềm năng giảm chi phí thông qua việc tối ưu hóa quyết định vận chuyển.

Trong thực tế, bài toán vận chuyển vật liệu xây dựng thường liên quan đến nhiều nhà cung cấp và nhiều công trường hoặc điểm tiếp nhận. Mỗi nhà cung cấp có khả năng cung ứng giới hạn, trong khi mỗi điểm tiếp nhận có nhu cầu vật liệu nhất định. Đồng thời, chi phí vận chuyển giữa các cặp điểm cung ứng & tiếp nhận có thể khác nhau. Vì vậy, cần xác định khối lượng vật liệu vận chuyển trên từng tuyến sao cho đáp ứng các yêu cầu cung ứng và nhu cầu, đồng thời giảm thiểu tổng chi phí vận chuyển. Đây là dạng bài toán vận tải kinh điển trong quy hoạch tuyến tính, có thể giải bằng các phương pháp tối ưu hóa phù hợp [3, 4].

Việc tối ưu hóa chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng từ lâu đã trở thành một chủ đề trọng tâm trong nghiên cứu vận hành và quản lý dự án. Trong các hệ thống cung ứng quy mô lớn, chi phí logistics chiếm một tỷ trọng đáng kể trong tổng chi phí đầu tư, do đó, việc ứng dụng các mô hình toán học để cực tiểu hóa chi phí này đã thu hút sự quan tâm của nhiều học giả và nhà quản trị. Mô hình vận tải trong quy hoạch tuyến tính đã được thừa nhận là nền tảng lý thuyết vững chắc cho các bài toán phân bổ nguồn lực. Nhiều nghiên cứu kinh điển về quy hoạch tuyến tính đã thiết lập cơ sở cho việc áp dụng các phương pháp đơn hình (simplex) trong giải quyết các bài toán vận tải phức tạp. Kể từ đó, các nghiên cứu tập trung vào việc cải thiện hiệu quả của các thuật toán nhằm giảm thiểu thời gian tính toán và tăng độ chính xác của nghiệm. Một hướng tiếp cận phổ biến là xây dựng mô hình toán học dựa trên hàm mục tiêu tối thiểu hóa tổng chi phí và các ràng buộc về năng lực cung ứng, nhu cầu tiếp nhận và tính không âm của biến quyết định.

Có nhiều thuật toán khác nhau để xác định phương án cơ sở ban đầu, các phương pháp này đã được nghiên cứu và phát triển trong nhiều công trình về bài toán vận tải [5, 6]. Việc lựa chọn phương pháp phù hợp nhất là yếu tố tiên quyết để đạt được hiệu quả chi phí tối đa. Mặc dù các phương pháp này đã được biết đến rộng rãi, nhưng việc đánh giá tính hiệu quả của chúng trong các kịch bản thực tế của ngành xây dựng là cần thiết nhằm cung cấp một khung ra quyết định vững chắc cho các nhà quản lý dự án, việc so sánh tính hiệu quả của các thuật toán này trong điều kiện thực tế của ngành Xây dựng, nơi có các đặc thù về khối lượng hàng lớn, thời gian giao hàng khắt khe và chi phí vận tải biến thiên vẫn là một khoảng trống cần được khai thác.

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn đó, bài báo tập trung ứng dụng các phương pháp toán học để tối ưu hóa vận chuyển vật liệu xây dựng thông qua một tình huống tính toán cụ thể. Bài nghiên cứu này kế thừa các lý thuyết kinh điển trên, đồng thời ứng dụng mô hình bài toán vận tải (quy hoạch tuyến tính) để giải quyết thách thức phân bổ và tối ưu hóa chi phí vận chuyển vật liệu xây dựng. Bằng việc thực nghiệm và so sánh các phương pháp: Góc Tây Bắc, Phần tử chi phí nhỏ nhất và Ưu tiên kép, bài báo tìm ra phương án ban đầu cũng như kiểm tra tính tối ưu trên bài toán cụ thể, nghiên cứu xác định phương pháp tính toán hiệu quả nhất, qua đó cung cấp quy trình thực tiễn giúp nâng cao hiệu quả quản lý chuỗi cung ứng trong các dự án xây dựng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học của bài toán vận tải

Bảng 1. Dữ liệu đầu vào

Nhà cung cấp	Người tiêu dùng				Khối lượng cung cấp
	A_1	A_2	…	A_n	
B_1	C_{11}	C_{12}	…	C_{1n}	b_1
B_2	C_{21}	C_{22}	…	C_{2n}	b_2
…	…	…	…	…	…
B_m	C_{m1}	C_{m2}	…	C_{mn}	b_m
Khối lượng cần vận chuyển	a_1	a_2	…	a_n	

Bài toán vận tải là một dạng đặc biệt của mô hình quy hoạch tuyến tính, được ứng dụng rộng rãi trong quản trị chuỗi cung ứng để xác định phương án phân phối hàng hóa từ nhiều điểm cung ứng đến nhiều điểm tiếp nhận với tổng chi phí nhỏ nhất nhằm tối ưu hóa mạng lưới logistics [3, 7]. Trong bài toán này, tập hợp các nhà cung cấp được ký hiệu là $S = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, tập hợp các điểm tiêu thụ là $D = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ và chi phí vận chuyển đơn vị C_{ij}.

Mục tiêu của bài toán là xác định ma trận biến quyết định $X = [X_{ij}]_{m\times n}$ trong đó X_{ij} là khối lượng hàng hóa vận chuyển từ nhà cung cấp B_j đến người tiêu dùng A_i. Hàm mục tiêu và hệ ràng buộc được thiết lập như sau:

$$minZ = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} C_{ij}\, X_{ij}$$

- Cân bằng cung: Tổng lượng xuất từ mỗi nhà cung cấp phải bằng công suất cho phép:

$$\sum_{i=1}^{n} X_{ij} = b_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

- Cân bằng cầu: Tổng lượng nhập vào mỗi điểm tiêu thụ phải đáp ứng đúng nhu cầu:

$$\sum_{j=1}^{m} X_{ij} = a_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

- Điều kiện phi âm: Lượng hàng hóa vận chuyển không thể là giá trị âm: $X_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j$

Việc xác định lời giải tối ưu cho hệ thống bài toán được thực hiện bằng cách áp dụng thuật toán vận tải thuộc mô hình quy hoạch tuyến tính.

2.2. Các thuật toán xây dựng phương án cơ sở ban đầu

Để giải bài toán vận tải, trước hết cần xác định một phương án cơ sở khả thi thỏa mãn các ràng buộc cung ứng và nhu cầu. Ba phương pháp được sử dụng là phương pháp Góc Tây Bắc, phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất và phương pháp Ưu tiên kép. Các phương pháp này khác nhau về quy tắc phân bổ lượng vận chuyển và có thể tạo ra những phương án ban đầu với tổng chi phí khác nhau.

a) Phương pháp Góc Tây Bắc: là phương pháp phi tham số, không xét đến đơn giá vận chuyển C_{ij}. Thuật toán bắt đầu tại ô $(1,1)$ và phân bổ tối đa có thể dựa trên ràng buộc hàng và cột, sau đó dịch chuyển theo hướng phải hoặc xuống dưới cho đến khi thỏa mãn toàn bộ cung - cầu. Ưu điểm là tính toán nhanh, nhưng nhược điểm là thường dẫn đến phương án cơ sở có chi phí rất cao, làm tăng số lượng vòng lặp tối ưu hóa [8, 9].

b) Phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất: là phương pháp tham số bậc 1, tập trung vào ma trận chi phí C_{ij}. Thuật toán ưu tiên phân bổ vào ô có chi phí vận chuyển thấp nhất trong toàn bộ ma trận. Việc này giúp "cô lập" các chi phí cao, tạo tiền đề cho chi phí tổng thể thấp hơn [8, 10].

c) Phương pháp Ưu tiên kép: là phương pháp dùng để xác định phương án xuất phát cho bài toán vận tải trong quy hoạch tuyến tính và vận trù học. Mục tiêu của phương pháp này là tìm ra một phân bổ ban đầu cho các tuyến vận chuyển sao cho chi phí được tối ưu ngay từ bước đầu, giúp rút ngắn thời gian lặp để đi đến phương án tối ưu cuối cùng [11].

3. VÍ DỤ ÁP DỤNG CÁC PHƯƠNG PHÁP TOÁN HỌC

Bảng 2. Dữ liệu đầu vào

Khối lượng vật liệu cần vận chuyển a_i	Khối lượng cung cấp tối đa của mỗi nhà cung cấp b_j				
	410	350	310	240	190
	Chi phí vận chuyển đơn vị C_{ij} (đơn vị)				
500	10	3	16	12	8
350	5	12	7	5	4
400	15	14	12	16	16
250	5	12	9	6	3

3.1. Phương pháp Góc Tây Bắc

Nguyên tắc thực hiện: Việc phân bổ nguồn lực của nhà cung cấp đầu tiên được thực hiện theo cách: trước hết đáp ứng nhu cầu của người tiêu dùng đầu tiên, sau đó đến người tiêu dùng thứ hai, v.v., cho đến khi phân bổ hết tài nguyên của nhà cung cấp đó. Sau khi đã phân bổ hết tài nguyên của nhà cung cấp đầu tiên, chúng ta chuyển sang nhà cung cấp thứ hai và phân bổ tài nguyên của họ theo cùng một cách. Việc phân bổ của các nhà cung cấp còn lại cũng được thực hiện theo thứ tự tương tự. Kết quả thu được là một phương án cơ sở ban đầu.

Tại mỗi ô (i, j), đặt giá trị $X_{ij} = \min$ (cung còn lại của B_i, nhu cầu còn lại của A_j). Sau khi điền, ta trừ giá trị đó khỏi cả cung và cầu tương ứng. Nếu cung của B_i hết, ta xuống dòng dưới. Nếu nhu cầu của A_j hết, ta sang cột bên phải. Kết quả sau khi thực hiện các phép toán ta thu được tại Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả sử dụng phương pháp Góc Tây Bắc

Khối lượng vật liệu cần vận chuyển a_i	Khối lượng cung cấp tối đa của mỗi nhà cung cấp b_j				
	410	350	310	240	190
500	10 410	3 90	16 -	12 -	8 -
350	5 -	12 260	7 90	5 -	4 -
400	15 -	14 -	12 220	16 180	16 -
250	5 -	12 -	9 -	6 60	3 190

Từ Bảng 3 ta tính được tổng chi phí vận chuyển là:

$L = (410 \times 10) + (90 \times 3) + (260 \times 12) + (90 \times 7) + (220 \times 12) + (180 \times 16) + (60 \times 6) + (190 \times 3) = 14570$ *(đơn vị)*

3.2. Phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất

Quy trình thực hiện: Trong trường hợp này, Phần tử chi phí nhỏ nhất nằm ở ô (a_4, b_5) với chi phí là 3. Đặt khối lượng vận chuyển lớn nhất có thể vào ô này là 190 đơn vị (vì $a_4 = 250$ và $b_5 = 190$, chọn $\min(250,190) = 190$).

Sau khi phân bổ, cột thứ năm được loại bỏ khỏi các bước xem xét tiếp theo. Tiếp tục tìm phần tử chi phí nhỏ nhất trong ma trận còn lại, đó là ô (a_2, b_1) với chi phí là 5. Vì $a_2 = 350$ và $b_1 = 410$, đặt khối lượng tối đa vào ô này là 350 đơn vị. Trong phần ma trận còn lại, chúng ta tiếp tục lặp lại quá trình tìm kiếm phần tử chi phí nhỏ nhất cho đến khi phân bổ hết tất cả các nguồn lực.

Bảng 4. Kết quả sử dụng phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất

Khối lượng vật liệu cần vận chuyển a_i	Khối lượng cung cấp tối đa của mỗi nhà cung cấp b_j				
	410	350	310	240	190
500	10 -	3 350	16 150	12 -	8 -
350	5 350	12 -	7 -	5 -	4 -
400	15 -	14 -	12 160	16 240	16 -
250	5 60	12 -	9 -	6 -	3 190

Tổng chi phí vận chuyển được tính bằng cách nhân khối lượng đã phân bổ với chi phí tương ứng của từng ô:

$L = (350 \times 5) + (60 \times 5) + (350 \times 3) + (150 \times 16) + (160 \times 12) + (240 \times 16) + (190 \times 3) = 11830$ *(đơn vị)*

4. PHƯƠNG PHÁP ƯU TIÊN KÉP

Trong ma trận chi phí (Bảng 4), trước hết chúng ta tìm phần tử nhỏ nhất trong mỗi hàng và đánh dấu các ô đó bằng ký hiệu "X". Sau đó, chúng ta tìm các giá trị chi phí nhỏ nhất trong các cột và cũng đánh dấu các ô tương ứng bằng ký hiệu "X".

Trước hết, chúng ta ưu tiên đặt số lượng vận chuyển tối đa có thể vào các ô được đánh dấu bằng ký hiệu "XX". Sau đó, theo thứ tự giá trị chi phí vận chuyển tăng dần, chúng ta tiếp tục đặt số lượng vận chuyển vào các ô được đánh dấu bằng một ký hiệu "X" và các ô còn lại không có dấu.

Bảng 5. Kết quả sử dụng phương pháp Ưu tiên kép

Khối lượng vật liệu cần vận chuyển a_i	Khối lượng cung cấp tối đa của mỗi nhà cung cấp b_j				
	410	350	310	240	190
500	10 -	xx 3 350	16 -	12 -	8 -
350	x 5 350	12 -	7 -	5 -	4 -
400	15 -	14 -	x 12 310	x 16 240	16 -
250	x 5 60	12 -	9 -	6 -	xx 3 190

Tổng chi phí vận chuyển được tính bằng cách nhân khối lượng đã phân bổ với chi phí tương ứng của từng ô:

$L = (350 \times 3) + (350 \times 5) + (310 \times 12) + (240 \times 16) + (60 \times 5) + (190 \times 3) = 11510$ *(đơn vị)*

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Kết quả

Bảng 5. So sánh kết quả của các phương pháp

Phương pháp	Tổng chi phí *(đơn vị)*	Chênh lệch so với phương pháp tốt nhất *(đơn vị)*	Chênh lệch (%)
Góc Tây Bắc	14570	3060	26,59%
Phần tử chi phí nhỏ nhất	11830	320	2,78%
Ưu tiên kép	11510	-	-

- Phương pháp Ưu tiên kép đạt tổng chi phí thấp nhất (11510 đơn vị), chứng minh đây là phương pháp xác định phương án xuất phát hiệu quả nhất trong 3 phương án.

- Phương pháp Phần tử chi phí nhỏ nhất: tổng chi phí là 11830 đơn vị, chỉ cao hơn phương pháp tốt nhất 320 đơn vị (tương đương 2,78%).

- Phương pháp Góc Tây Bắc: tổng chi phí kết quả cao nhất với 14.570 đơn vị, chênh lệch tới 3.060 đơn vị (tương đương 26,59%) so với phương pháp ưu tiên kép.

5.2. Thảo luận

Qua kết quả thực nghiệm, có thể rút ra những đánh giá trọng tâm về hiệu quả vận hành của ba phương pháp:

- Phương pháp Góc Tây Bắc: Có lợi thế tuyệt đối về tốc độ thực hiện. Phương pháp này không đòi hỏi tính toán chi phí, phù hợp để tạo nhanh phương án dự phòng. Tuy nhiên, do bỏ qua ma trận chi phí C_{ij}, nghiệm tìm được thường rất xa so với tối ưu, gây lãng phí ngân sách lớn trong dài hạn.

- Phương pháp Phần tử chi phi nhỏ nhất: Cải thiện rõ rệt so với phương pháp góc Tây Bắc nhờ việc tận dụng các tuyến đường giá rẻ. Đây là phương pháp cân bằng tốt giữa tính đơn giản và hiệu quả kinh tế. Nó giúp giảm tổng chi phí đáng kể mà không đòi hỏi các phép tính phức tạp.

- Phương pháp Ưu tiên kép: Là phương pháp tối ưu nhất về mặt chi phí. Bằng cách tính toán "chi phí cơ hội", thuật toán này giúp nhà quản lý "nhìn xa trông rộng", tránh bị kẹt vào các lựa chọn đắt đỏ do các ràng buộc cục bộ. Dù yêu cầu tính toán nhiều bước hơn, đây là công cụ mạnh mẽ nhất để tối ưu hóa ngân sách logistics trong các dự án quy mô lớn.

Để tối đa hóa lợi nhuận, nhà quản lý nên áp dụng Phương pháp ưu tiên kép cho các kế hoạch dài hạn. Trong trường hợp cần phản ứng nhanh với biến động cung cầu tức thời, Đây là một trong những lựa chọn hợp lý để đảm bảo cân bằng giữa tính chính xác và tốc độ xử lý.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã góp phần làm sáng tỏ tầm quan trọng của việc ứng dụng các mô hình vận tải trong quy hoạch tuyến tính nhằm tối ưu hóa chuỗi cung ứng vật liệu xây dựng. Kết quả thực nghiệm khẳng định rằng, trong bối cảnh các dự án xây dựng đòi hỏi sự khắt khe về chi phí và tiến độ, việc lựa chọn thuật toán xác định phương án cơ sở ban đầu là một quyết định chiến lược có tác động trực tiếp đến hiệu quả kinh tế của toàn bộ dự án.

Thông qua việc so sánh ba thuật toán phổ biến, nghiên cứu đã rút ra những kết luận then chốt:

- Tính hiệu quả của phương pháp: Trong khi thuật toán Góc Tây Bắc chỉ mang tính chất đơn giản hóa, Phần tử chi phí nhỏ nhất và đặc biệt là phương pháp Ưu tiên kép đã chứng minh năng lực vượt trội trong việc kiểm soát ma trận chi phí. Các phương pháp tham số này không chỉ giảm thiểu tổng chi phí vận chuyển mà còn tạo nền tảng vững chắc cho các bước tối ưu hóa chuyên sâu tiếp theo.

- Việc chuyển dịch từ phương pháp quản lý kinh nghiệm sang áp dụng mô hình toán học định lượng giúp các nhà quản lý dự án minh bạch hóa quy trình phân bổ nguồn lực, nâng cao tính bền vững và khả năng cạnh tranh về chi phí cho doanh nghiệp.

- Dù các mô hình quy hoạch tuyến tính cung cấp công cụ tối ưu mạnh mẽ, quá trình ứng dụng cần kết hợp hài hòa với các yếu tố thực tế như sự biến thiên của thị trường, độ tin cậy của nhà cung cấp và các chỉ số về môi trường.

Việc tối ưu hóa chuỗi cung ứng không chỉ là một bài toán kỹ thuật mà là đòn bẩy chiến lược để nâng cao hiệu quả vận hành. Nghiên cứu này hy vọng sẽ cung cấp một khung tham chiếu hữu ích, hỗ trợ các nhà quản lý dự án xây dựng trong việc ra quyết định chính xác, góp phần vào sự phát triển ổn định và bền vững của ngành xây dựng hiện đại. Cần lưu ý rằng các kết quả tính toán ví dụ trong nghiên cứu này mang tính chất tham khảo. Do quy mô của ví dụ áp dụng còn giới hạn, tính tổng quát của các kết luận có thể thay đổi trong các trường hợp thực tế khác nhau. Đây cũng là tiền đề quan trọng để tác giả mở rộng phạm vi nghiên cứu trong các công trình tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tô Thị Hương Quỳnh, Nguyễn Phương Châm. Nghiên cứu chiến lược cho quản trị logistics trong xây dựng tiền chế tại Việt Nam áp dụng phương pháp AHP. Tạp chí Xây dựng, 2025. Internet: https://tapchixaydung.vn/chien-luoc-quan-tri-logistics-trong-xay-dung-tien-che-ap-dung-phuong-phap-ahp-20201224000029466.html (truy cập: tháng 7/2026).

[2] Yi, W., S. Wang, and A. Zhang. Optimal transportation planning for prefabricated products in construction. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 35, no. 4, pp. 342-353, 2020, doi: https://doi.org/10.1111/mice.12504.

[3] Shore, H.H. The transportation problem and the Vogel approximation method. Decision Sciences, vol. 1, no. 3-4, pp. 441-457, 1970, doi: https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1970.tb00792.x.

[4] Phạm Quý Mười, Phan Thị Như Quỳnh. Phương pháp Ellipsoid cải tiến và ứng dụng giải bài toán quy hoạch tuyến tính (Modified Ellipsoid Method and Its Application to Linear Programming Problems). Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 9(94), tr. 99-103, 2015.

[5] Korukoğlu, S. and S. Ballı. An Improved Vogel's Approximation Method for the Transportation Problem. Mathematical and Computational Applications, vol. 16, no. 2, pp. 370-381, 2011, doi: https://doi.org/10.3390/mca16020370.

[6] Pratihar, J., et al. Modified Vogel's approximation method for transportation problem under uncertain environment. Complex & Intelligent Systems, vol. 7, no. 1, pp. 29-40, 2021, doi: https://dx.doi.org/10.1007/s40747-020-00153-4.

[7] І.А.Шатрова. Оптимізація використання ресурсів будівництві (Оптимізація використання будівельних машин і транспорту у будівництві) Завдання і методичні вказівки до виконання Курсової роботи №2 для студентів спеціальності: 192 «Будівництво та цивільна інженерія» денної і заочної форми навчання, ed. К.:КНУБА, 2018.

[8] Adeyeye, A.C., A.S. Adekola and O.C. Kehinde. Comparison of methods of solving transportation problems (tp) and resolving the associated variations. American Journal of Theoretical and Applied Statistics, vol. 11, no. 5, pp. 140-149, 2022, doi: https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20221105.11.

[9] Szkutnik-Rogoż, J., et al. Mathematical Programming and Solution Approaches for Transportation Optimisation in Supply Network. Energies,. vol. 14, no. 21, p. 7010, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/en14217010.

[10] Amaliah, B., C. Fatichah and E. Suryani. A new heuristic method of finding the initial basic feasible solution to solve the transportation problem. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 34, no. 5, pp. 2298-2307, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.07.007.

[11] Krstev, A., et al. Comparative analysis of initial solution methods for the transportation problem. Balkan Journal of Applied Mathematics and Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 43-54, 2026, doi: https://doi.org/10.46763/BJAMI269143k.

■Ngày nhận bài: 02/8/2026 ■Ngày sửa bài: 15/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/8/2026

Nghiên cứu hệ thống quản lý an toàn và vệ sinh lao động trong xây dựng tại Việt Nam

Investigation of construction safety and health management system in Viet Nam

> TS PHẠM ĐĂNG KHOA
Khoa Công nghệ Xây dựng - Giao thông, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội
Email: phamdangkhoa@vnu.edu.vn

TÓM TẮT

Quản lý an toàn và vệ sinh lao động (ATVSLĐ) luôn là mối quan tâm hàng đầu của các doanh nghiệp trong thi công xây dựng. Để phòng ngừa tai nạn lao động và bệnh nghề nghiệp, tạo môi trường làm việc an toàn cho người lao động, máy, thiết bị và công trình, việc xây dựng hệ thống quản lý ATVSLĐ là yêu cầu cần thiết. Trên cơ sở khoa học, pháp lý, kinh nghiệm thực tiễn và góc nhìn của tác giả, bài viết trình bày một số nội dung nghiên cứu về hệ thống quản lý ATVSLĐ hiện hành trong ngành Xây dựng ở Việt Nam, tập trung vào mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ. Qua đó, người đọc có thể tiếp cận những kiến thức cơ bản về tổ chức bộ máy và vận dụng vào thực tiễn quản lý ATVSLĐ trong xây dựng. Đặc biệt, nghiên cứu đề xuất một mô hình tổ chức bộ máy tương đối phù hợp với chức năng, nhiệm vụ của các bộ phận và tuân thủ quy định của pháp luật. Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng sẽ là nguồn tài liệu tham khảo hữu ích cho các doanh nghiệp xây dựng Việt Nam.

Từ khóa: Quản lý; an toàn và vệ sinh lao động; xây dựng; Việt Nam.

ABSTRACT

Safety and health management has always been one of the most important concerns for any construction enterprise. In order to prevent occupational accidents and diseases and to create safe working environment for people, machinery, equipment, and construction projects, establishment an effective system of safety and health management is essential. Based on fundamental theory and legal framework, practical experiences, and author's perspective, the research presents findings on the current safety and health management system in Viet Nam construction industry, focused specifically on the organizational model of the system. These results provide relatively comprehensive knowledge on establishment and practical application of the model. This is also among the first in Viet Nam to propose an organizational structure in terms to functions and responsibilities of components, in compliance with current legal regulations. It is expected that the research results would be useful reference for Viet Nam construction enterprises.

Keyword: Safety and health, Construction, Management system, Viet Nam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bảo đảm ATVSLĐ luôn là mối quan tâm hàng đầu của các doanh nghiệp trong ngành Xây dựng trên thế giới [1, 2, 3, 4] nói chung và ở Việt Nam [5, 6, 7] nói riêng. Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh hội nhập quốc tế, phát triển nền kinh tế và nâng cao năng lực tự chủ về khoa học và công nghệ, nhiều dự án bất động sản, dự án xây dựng cơ sở hạ tầng, khu đô thị và trung tâm thương mại đã, đang và sẽ được triển khai bởi các doanh nghiệp cổ phần có vốn nhà nước, doanh nghiệp tư nhân và doanh nghiệp có vốn đầu tư nước ngoài. Với mục tiêu bảo đảm chất lượng, tiến độ thi công và kiểm soát chi phí trong phạm vi được phê duyệt, công tác bảo đảm ATVSLĐ tại các doanh nghiệp này càng trở nên quan trọng. Trong đó, quản lý ATVSLĐ là nội dung cốt lõi của hệ thống quản lý ATVSLĐ.

Theo quan điểm của tác giả, hệ thống quản lý ATVSLĐ trong các doanh nghiệp xây dựng là phương thức tổ chức và vận hành công tác quản lý ATVSLĐ, được thể hiện thông qua sơ đồ tổ chức, kế hoạch, quy trình và các hoạt động liên quan. Hệ thống này nhằm chỉ đạo, điều hành, điều phối, kiểm tra, giám sát, cải tiến và kiểm soát các hoạt động, hướng tới mục tiêu phòng ngừa tai nạn lao động và bệnh nghề nghiệp trong thi công xây dựng công trình. Các nội dung của hệ thống quản lý ATVSLĐ không chỉ thuộc lĩnh vực khoa học quản lý [8, 9, 10] mà còn được quy định cụ thể trong các văn bản pháp luật hiện hành của Việt Nam [11, 12, 13].

Hiện đã có một số nghiên cứu tiêu biểu về nội dung này [14, 15, 16]. Mặc dù vậy, có thể thấy rằng các kết quả nghiên cứu mới dừng lại ở các nội dung hẹp mà chưa thực sự phản ánh được một cách tổng thể và đầy đủ về các góc độ của hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng tại Việt Nam, đặc biệt là chưa đưa ra được mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ, chưa phân tích gốc của mối quan hệ giữa các bộ phận/đơn vị theo quy định tương đối phức tạp của hệ thống pháp luật. Từ trước đến nay, cũng chưa có nghiên cứu nào được thực hiện một cách tương đối trọn vẹn về nội dung này. Chính vì vậy, nhằm giúp các doanh nghiệp xây dựng Việt Nam có chính sách quản lý về ATVSLĐ được hiệu quả hơn, căn cứ vào các quy định hiện hành của Việt Nam về ATVSLĐ, kinh nghiệm thực tiễn của tác giả, các kết quả nghiên cứu chuyên sâu và ý kiến đóng góp của các chuyên gia trong và ngoài nước, nghiên cứu này nhằm mô hình hóa và đưa ra các phân tích tương đối cụ thể và đầy đủ, phù hợp với pháp

luật Việt Nam về hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng, góp phần thúc đẩy Ngành Xây dựng phát triển theo hướng bền vững, trở thành biểu tượng của sự ATVSLĐ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để nghiên cứu về hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng ở Việt Nam, cần dựa trên cơ sở lý thuyết về công tác quản lý nói chung và quản lý ATVSLĐ trong xây dựng nói riêng. Tuy nhiên, để các nội dung của nghiên cứu này áp dụng được ngay cho các doanh nghiệp xây dựng thì yếu tố quy định pháp lý là bắt buộc. Chính vì vậy, tác giả đã sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực tiễn để tổng hợp và mô hình hóa cơ sở lý thuyết và quy định pháp luật về hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng ở Việt Nam. Qua mô hình này, các nội dung của hệ thống được phân tích kỹ lưỡng, diễn dịch cụ thể để có thể ứng dụng hiệu quả trong thực tế.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Khái niệm về hệ thống quản lý An toàn, vệ sinh lao động - Phạm vi nghiên cứu

Theo [8], quản lý là một hệ thống bao gồm những yếu tố cơ bản: chủ thể quản lý, đối tượng quản lý, mục tiêu quản lý, công cụ, phương tiện quản lý, cách thức quản lý (có ý thức, bằng quyền lực, theo quy trình) và môi trường quản lý.

Dựa vào khái niệm trên và kinh nghiệm nhiều năm công tác, tác giả cho rằng hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng là mô hình bao gồm các hoạt động nhằm phát hiện và đánh giá các nguy cơ gây tai nạn (TN) và bệnh nghề nghiệp (BNN) có thể xảy ra trong quá trình thi công xây dựng, từ đó lập kế hoạch, tổ chức bộ máy, xây dựng các chính sách, điều hành công việc theo các quy trình, điều phối nguồn lực và kiểm soát công việc để đạt được mục tiêu đã đề ra. Đối với quản lý ATVSLĐ trong xây dựng, đây là hoạt động của con người và hướng tới quản lý con người với mục tiêu đảm bảo ATVSLĐ cho người bên trong công trường và bên ngoài công trường, an toàn cho máy và thiết bị thi công, an toàn cho công trình đang thi công và công trình xung quanh công trường.

Do nội dung về quản lý tương đối rộng nên phạm vi của nghiên cứu này tập trung vào mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ của nhà thầu thi công trên công trường xây dựng. Tác giả sẽ căn cứ vào chức năng, nhiệm vụ của các bộ phận theo quy định pháp luật để hệ thống hóa và phân tích mối quan hệ "cơ hữu" trong công tác quản lý ATVSLĐ trong xây dựng.

3.2. Đề xuất mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ tại Việt Nam

Như đã trình bày ở trên, để quản lý ATVSLĐ trên công trường xây dựng, nhất thiết phải có bộ máy phụ trách công tác này, hay nói cách khác, phải có người thực hiện. Đó là những người lập kế hoạch, theo dõi, kiểm tra, giám sát, sơ cứu, cấp cứu, phòng cháy, chữa cháy, cứu nạn, cứu hộ trong công tác đảm bảo ATVSLĐ, và họ được sắp xếp, bố trí ở các bộ phận khác nhau trong bộ máy quản lý ATVSLĐ. Tại Việt Nam, công tác quản lý ATVSLĐ nói chung và trên công trường xây dựng nói riêng không những dựa trên khoa học về quản lý mà còn buộc phải tuân theo các quy định của pháp luật và chịu sự thanh tra, giám sát bởi cơ quan quản lý nhà nước.

Mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ của doanh nghiệp nói chung và của doanh nghiệp xây dựng nói riêng, trong đó có nhà thầu trên công trường xây dựng theo quy định của Việt Nam, được tác giả đề xuất như trong Hình 1, gồm 6 thành phần:

1) Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động (Điều 75 của Luật An toàn, vệ sinh lao động và Điều 38 của Nghị định số 39/2016/NĐ-CP [18]).

2) Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động tại công trường (Điều 72 của Luật An toàn, vệ sinh lao động và Điều 36 của Nghị định số 39/2016/NĐ-CP).

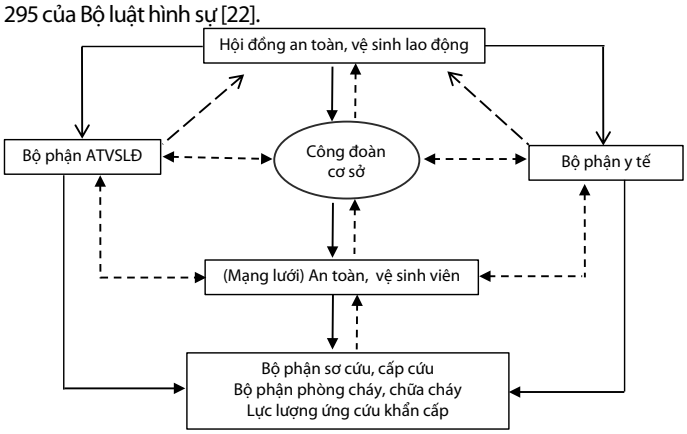
3) Công đoàn cơ sở (Điều 10 của của Luật An toàn, vệ sinh lao động).

4) Bộ phận y tế (Điều 73 của của Luật An toàn, vệ sinh lao động và Điều 37 của Nghị định số 39/2016/NĐ-CP).

5) (Mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên (Điều 74 của Luật An toàn, vệ sinh lao động).

6) Bộ phận sơ cứu, cấp cứu, Bộ phận phòng cháy và chữa cháy, Lực lượng ứng cứu khẩn cấp tại công trường (Điều 7 của Thông tư số 19/2016/TT-BYT [19]; Điều 37 của Luật Phòng cháy, chữa cháy và cứu nạn, cứu hộ [20]; và Điều 79 của Luật An toàn, vệ sinh lao động).

Nhà nước cũng quy định rất rõ về việc xử phạt nếu Người sử dụng lao động (doanh nghiệp) không tổ chức Bộ phận hoặc Người làm công tác ATVSLĐ, công tác y tế hoặc bố trí người không đủ điều kiện theo quy định của pháp luật tại Điều 20 của Nghị định số 28/2020/NĐ-CP [21] và tại Điều 295 của Bộ luật hình sự [22].



Hình 1. Mô hình đề xuất hệ thống tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ của nhà thầu tại công trường xây dựng

- Mũi tên liền nét thể hiện sự chỉ đạo trực tiếp;

- Mũi tên đứt nét thể hiện sự phối hợp.

3.3. Giải thích mô hình tổ chức bộ máy quản lý ATVSLĐ đề xuất tại công trường xây dựng

Theo mô hình trong Hình 1, có thể nhận thấy Hội đồng ATVSLĐ có vai trò quan trọng nhất trong việc chỉ đạo các bộ phận để tổ chức, lập kế hoạch, theo dõi, kiểm tra, kiểm soát công tác ATVSLĐ. Mũi tên liền nét biểu thị sự chỉ đạo trực tiếp từ Hội đồng ATVSLĐ tới các bộ phận. Công đoàn cơ sở ở trung tâm của mô hình có vai trò như cầu nối giữa người sử dụng lao động và người lao động, phối hợp với Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động và Bộ phận y tế (mũi tên đứt nét) để điều tiết công tác ATVSLĐ. Vì thế, Công đoàn cơ sở cũng chỉ đạo (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên thực hiện công tác ATVSLĐ trong doanh nghiệp xây dựng. (Mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên rộng khắp được ví như tai mắt của bộ máy quản lý ATVSLĐ vì họ luôn bám sát với công tác ATVSLĐ ở mọi lúc, mọi nơi.

Trong tương lai gần, tại Việt Nam, (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên sẽ được sự hỗ trợ đắc lực của các công nghệ tiên tiến như các thiết bị camera AI, cảm biến, thiết bị bay không người lái, ứng dụng IoT,…v.v. Khi có sự cố hoặc tai nạn, Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động, (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên và bộ phận y tế sẽ phối hợp ngay lập tức với bộ phận sơ cứu, cấp cứu, bộ phận phòng cháy, chữa cháy và Lực lượng ứng cứu khẩn cấp để xử lý kịp thời.

Trong thực tế, tùy thuộc vào quy mô của doanh nghiệp, số lượng người làm việc mà mô hình trên có thể được đơn giản hóa, giảm bớt hoặc sáp nhập. Khi doanh nghiệp chưa bố trí được người phù hợp, doanh nghiệp đó hoàn toàn có thể thuê các tổ chức có chức năng và đủ điều kiện tham gia vào bộ phận nào đó trong mô hình trên, ví dụ như bộ phận y tế.

3.3.1. Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động

Theo quy định tại Điều 75 của Luật An toàn, vệ sinh lao động và Điều 38 của Nghị định số 39/2016/NĐ-CP, tùy theo quy mô, tính chất lao động, nguy cơ gây TNLĐ, BNN và điều kiện lao động mà Người sử dụng lao động thành lập Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở. Đối với cơ sở sản xuất, kinh doanh thuộc lĩnh vực thi công xây dựng có sử dụng 300 người lao động trở lên; hoặc Tập đoàn kinh tế, Tổng công ty nhà nước (sử dụng vốn

nhà nước), bắt buộc phải thành lập Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở. Đối với cơ sở sản xuất, kinh doanh trong lĩnh vực thi công xây dựng có sử dụng dưới 300 người lao động, việc thành lập Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở không bắt buộc, và chỉ thành lập nếu thấy cần thiết và đủ điều kiện để hoạt động.

Thành phần của Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở gồm 5 nhóm thành viên, cụ thể:

- Chủ tịch hội đồng: Đại diện Người sử dụng lao động.

- Phó chủ tịch hội đồng: Đại diện Ban chấp hành Công đoàn cơ sở (Chủ tịch Công đoàn) hoặc Đại diện tập thể người lao động nơi chưa có tổ chức Công đoàn.

- Ủy viên thường trực kiêm thư ký hội đồng: Người làm công tác ATVSLĐ của cơ sở, thành viên này sẽ có mặt tại tất cả các cuộc họp của hội đồng.

- Ủy viên: Người làm công tác y tế của cơ sở.

- Ủy viên: Các thành viên khác có liên quan. Trong luật không quy định cụ thể về các ủy viên này, tuy nhiên, có thể chỉ ra một số thành viên liên quan trong thi công xây dựng như đại diện các nhà thầu phụ, tổ trưởng tổ thi công, trưởng các bộ phận tư vấn thiết kế, tư vấn giám sát,...

Luật cũng chỉ rõ thành phần của Hội đồng phải đảm bảo tỷ lệ nam, nữ trên nguyên tắc bình đẳng giới cũng như điều kiện thực tế tại công trường. Với đặc thù trong thi công xây dựng, nơi chủ yếu là nam giới nhưng cũng không ít công nhân nữ thì nên có thành viên là nữ trong hội đồng để đảm bảo quyền lợi chính đáng của họ về ATVSLĐ.

Để thực hiện tốt vai trò của mình, Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở cần sự hỗ trợ của các bộ phận khác như Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động mà cụ thể là cán bộ an toàn chuyên trách hoặc bán chuyên trách hoặc Phòng an toàn, vệ sinh lao động, của Công đoàn cơ sở và của bộ phận y tế, như đã chỉ ra trong Hình 1. Ở đây, Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động cơ sở là nơi chỉ đạo thực hiện của cấp trên xuống cấp dưới đối với các bộ phận.

3.3.2. Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động tại công trường

Căn cứ vào quy mô, tính chất lao động, nguy cơ TNLĐ, BNN và điều kiện lao động mà người sử dụng lao động phải bố trí người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động hoặc thành lập Bộ phận quản lý công tác an toàn, vệ sinh lao động tại cơ sở. Tại công trường xây dựng, bộ phận này có thể là Phòng an toàn, vệ sinh lao động. Trong lĩnh vực thi công công trình xây dựng, Người sử dụng lao động phải tổ chức bộ phận an toàn, vệ sinh lao động bảo đảm các yêu cầu tối thiểu [11].

Khái niệm về Người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động theo chế độ chuyên trách và bán chuyên trách có thể được hiểu như sau:

- Đối với người theo chế độ chuyên trách: Người đó có ký kết hợp đồng với doanh nghiệp ở vị trí việc làm là công tác an toàn, vệ sinh lao động và được hưởng lương của công tác này, hay nói cách khác, họ chỉ thực hiện 1 nhiệm vụ về an toàn, vệ sinh lao động, tức là theo chế độ làm toàn thời gian.

- Đối với người theo chế độ bán chuyên trách: Người được giao thêm nhiệm vụ về an toàn, vệ sinh lao động ngoài nhiệm vụ khác được giao của doanh nghiệp. Như vậy, người này phải dành thời gian trong khoảng thời gian làm việc hàng ngày để thực hiện nhiệm vụ về an toàn, vệ sinh lao động, tức là theo chế độ làm bán thời gian.

Theo quy định, người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động có yêu cầu trình độ ở bậc đại học, cao đẳng và trung cấp thuộc chuyên ngành Kỹ thuật xây dựng (hoặc ngành gần như Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông,...) và có kinh nghiệm trong lĩnh vực thi công xây dựng công trình.

Trong thực tế, có trường hợp doanh nghiệp xây dựng có bố trí người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động đáp ứng yêu cầu về trình độ và chuyên ngành nhưng chưa đủ số năm kinh nghiệm theo quy định, khi đó doanh nghiệp hoàn toàn có thể bị cơ quan quản lý nhà nước xử phạt khi thanh tra, kiểm tra với lỗi bố trí người không phù hợp. Tuy nhiên, khi doanh nghiệp đã bố trí người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động thì nhiều trường hợp cơ quan chức năng sẽ xem xét mức phạt phù hợp nhất cho doanh nghiệp đó. Còn đối với người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động chưa đủ số năm kinh nghiệm, nếu theo thời gian, người đó đáp ứng yêu cầu công việc thì doanh nghiệp hoàn toàn có thể công nhận cho họ để họ có đủ thời gian kinh nghiệm theo quy định.

Nhà nước cũng cho phép doanh nghiệp thuê các tổ chức có đủ năng lực theo quy định của pháp luật thực hiện các nhiệm vụ ATVSLĐ nếu doanh nghiệp đó không bố trí được người hoặc không thành lập được Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động theo quy định.

3.3.3. Công đoàn cơ sở

Theo sơ đồ trong Hình 1, Công đoàn cơ sở có vai trò và vị trí rất quan trọng, là bộ phận trung gian truyền đạt ý kiến của người lao động, đối thoại, đấu tranh, thương lượng, ký kết, giám sát, phối hợp với người sử dụng lao động để đảm bảo ATVSLĐ. Công đoàn cơ sở cũng là bộ phận tuyên truyền, vận động, giúp đỡ người lao động để đảm bảo các quyền và nghĩa vụ trong thực hiện công tác ATVSLĐ. Đặc biệt, Công đoàn cơ sở là nơi chỉ đạo và tiếp nhận ý kiến từ (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên để kiến nghị lên Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động, Người sử dụng lao động và Lãnh đạo doanh nghiệp (với vai trò của Ủy viên thường trực - Phó Hội đồng an toàn, vệ sinh lao động) để giải quyết những vấn đề phát sinh, những khó khăn, vướng mắc về công tác ATVSLĐ một cách nhanh chóng.

3.3.4. Bộ phận y tế

Theo Điều 73 của Luật An toàn, vệ sinh lao động, căn cứ vào quy mô, tính chất lao động, nguy cơ tai nạn lao động, bệnh nghề nghiệp, điều kiện lao động mà người sử dụng lao động phải bố trí người làm công tác y tế hoặc thành lập bộ phận y tế chịu trách nhiệm chăm sóc và quản lý sức khỏe của người lao động. Cụ thể, tại Điều 37 của Nghị định số 39/2016/NĐ-CP, đối với lĩnh vực thi công xây dựng, yêu cầu tối thiểu về số người của bộ phận y tế.

Thực tế cho thấy, người làm công tác y tế có vai trò quan trọng trong việc tổ chức và thực hiện sơ cứu, cấp cứu tại hiện trường khi xảy ra tai nạn lao động, góp phần hạn chế mức độ nghiêm trọng của chấn thương và nguy cơ tử vong trước khi người bị nạn được chuyển đến cơ sở y tế. Đặc biệt, tại công trường xây dựng, nơi tiềm ẩn nhiều nguy cơ tai nạn, việc trang bị kiến thức và kỹ năng sơ cứu, cấp cứu cho người làm công tác y tế và lực lượng được phân công tham gia sơ cứu, cấp cứu là rất cần thiết. Do đó, cần thường xuyên tổ chức các lớp tập huấn, bồi dưỡng nghiệp vụ nhằm nâng cao kiến thức và kỹ năng sơ cứu, cấp cứu cho lực lượng này.

Nhà nước cũng cho phép khi công trường không bố trí được người làm công tác y tế hoặc không thành lập được bộ phận y tế theo quy định thì theo quy định sau:

- Ký hợp đồng với cơ sở khám bệnh, chữa bệnh đủ năng lực, cung cấp đủ số lượng Người làm công tác y tế theo quy định, có mặt kịp thời tại cơ sở sản xuất khi xảy ra các trường hợp khẩn cấp trong thời hạn 30 phút đối với vùng đồng bằng, thị xã, thành phố và 60 phút đối vùng núi, vùng sâu, vùng xa.

- Thông báo thông tin cơ sở khám bệnh, chữa bệnh trên theo mẫu với Sở Y tế cấp tỉnh, nơi cơ sở có trụ sở chính.

3.3.5. (Mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên tại công trường

(Mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên tại công trường là An toàn, vệ sinh viên của các bộ phận, các tổ, đội thi công được tập hợp thành mạng lưới, tức là được tổ chức thành hệ thống.

(Mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên với vai trò là người giám sát ATVSLĐ ở mọi lúc và mọi nơi trong quá trình thi công xây dựng công trình. Thực tế cho thấy, dù đã có bộ phận an toàn, vệ sinh lao động, có người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động nhưng với đặc thù công trường xây dựng rộng, nhiều công việc đan xen thực hiện theo chiều ngang, chiều cao và chiều sâu công trình, khối lượng công việc lớn, công nghệ xây dựng phức tạp, nhiều tổ, đội thi công, các yếu tố nguy hiểm và có hại luôn tiềm ẩn tại mọi thời điểm,...v.v. nhưng số lượng người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động lại không nhiều nên sẽ không đủ người và thời gian để có thể giám sát hết các công việc trên công trường. Do đó, nếu bố trí được mạng

lưới giám sát ATVSLĐ thì sẽ mở rộng được người giám sát an toàn trực tiếp tại các vị trí làm việc, góp phần kịp thời phát hiện nguy cơ gây TNLĐ hoặc BNN trong quá trình thi công.

Mặt khác, nếu chỉ bố trí người làm công tác an toàn, vệ sinh lao động giám sát thì trong trường hợp nào đó, họ chỉ chuyên về một số nhóm kiến thức chuyên sâu, trong khi công việc trong thi công xây dựng lại phức tạp, nhất là khi các công nghệ mới được áp dụng, và vì thế nếu họ không nắm bắt được công việc thì họ sẽ không thể đánh giá hết được các rủi ro có thể xảy ra đối với công việc. Chính vì thế, tổ chức mạng lưới An toàn, vệ sinh viên ở từng vị trí làm việc và ở từng tổ đội thi công là rất hiệu quả vì họ nắm chắc quy trình công nghệ, biện pháp, máy và thiết bị, vật liệu thi công, các nguy cơ gây TNLĐ và BNN và như vậy, họ là người hỗ trợ đắc lực cho công tác giám sát ATVSLĐ trong quá trình thi công xây dựng.

Theo quy định, (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên hoạt động dưới sự chỉ đạo của Công đoàn cơ sở - đại diện cho tập thể Người lao động, để giám sát việc thực hiện ATVSLĐ của người sử dụng lao động, hay nói cách khác, (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên thể hiện sự giám sát của Công đoàn cơ sở đối với người sử dụng lao động về công tác ATVSLĐ.

Để các An toàn, vệ sinh viên được "danh chính ngôn thuận" trong quá trình thực hiện công việc, được đông đảo người lao động tin tưởng là người giám sát ATVSLĐ cho họ, lãnh đạo doanh nghiệp cần có Quyết định cho các An toàn, vệ sinh viên này, trong đó ghi rõ trách nhiệm, quyền lợi cũng như có quy chế hoạt động cụ thể, và Quyết định này được thông báo rộng rãi đến tập thể người lao động trên công trường. Trong quy chế hoạt động, ngoài các nhiệm vụ chuyên môn, cũng nên chỉ rõ các mốc, khoảng thời gian phải thực hiện nhiệm vụ ATVSLĐ cho An toàn, vệ sinh viên, ví dụ đầu giờ, giữa giờ, cuối giờ làm gì, làm bao nhiêu lâu, báo cáo kết quả cho ai (thường là tổ trưởng tổ thi công hoặc người ở Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động),…v.v. Cần lưu ý đến trách nhiệm và cơ chế làm việc cho An toàn, vệ sinh viên ở từng bộ phận, từng tổ đội thi công khác nhau vì trên công trường có tương đối nhiều các vị trí làm việc có đặc thù như làm việc ở dưới xưởng gia công, làm việc dưới tầng hầm, thi công trên các sàn, tầng,…v.v. Ngoài ra, cũng chú ý tới chế độ phụ cấp cho An toàn, vệ sinh viên trong công tác ATVSLĐ. Khoản phụ cấp này do tổ chức Công đoàn cơ sở thống nhất với người sử dụng lao động một con số cụ thể với các mức trách nhiệm tương ứng.

Đối với doanh nghiệp xây dựng, một nội dung quan trọng là lựa chọn được An toàn, vệ sinh viên phù hợp với từng tổ, đội thi công trên công trường. Điều này nhiều khi còn quan trọng hơn là chọn người giỏi nhất (về kỹ thuật) trong tổ, đội thi công đó. Thực tế cho thấy, người được lựa chọn làm An toàn, vệ sinh viên thường là người nhiệt huyết, tận tụy, cẩn trọng, có kinh nghiệm, gắn bó với công nhân và với doanh nghiệp. Chính vì thế mà họ lại càng muốn cống hiến cho doanh nghiệp của mình thông qua nhiệm vụ của An toàn, vệ sinh viên. Tuy nhiên, về mặt nghiệp vụ an toàn, các An toàn, vệ sinh viên vẫn cần phải được tập huấn từ bộ phận an toàn, vệ sinh lao động thông qua Công đoàn cơ sở để họ có thể thực hiện tốt nhiệm vụ của mình.

Như vậy, mối liên kết giữa cán bộ an toàn, bộ phận an toàn, vệ sinh lao động với (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên càng tốt, càng chặt chẽ, việc quản lý ATVSLĐ trong xây dựng càng thuận lợi cho doanh nghiệp. Mọi thông tin về nguy cơ, rủi ro về TNLĐ hay BNN tại mọi vị trí trên công trường đều được Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động nắm được và chỉ đạo, góp ý kịp thời thông qua hình ảnh, tin nhắn hoặc xuống chỉ đạo trực tiếp tại hiện trường với các công cụ phổ biến như Zalo, WhatApp,… trên điện thoại di động hoặc máy vi tính.

3.3.6. Bộ phận sơ cứu, cấp cứu; bộ phận phòng cháy, chữa cháy; lực lượng ứng cứu (khẩn cấp) tại công trường

Theo sơ đồ trong Hình 1, thì 3 bộ phận trên, có thể gọi là 3 lực lượng hoặc 3 đội, nằm dưới sự hướng dẫn, chỉ đạo của Bộ phận an toàn, vệ sinh lao động, các An toàn, vệ sinh viên và bộ phận y tế. Ở đây, cần lưu ý đặc biệt tới sự phối hợp chặt chẽ của 3 bộ phận này với (mạng lưới) An toàn, vệ sinh viên để góp phần duy trì tình trạng ATVSLĐ tại công trường, hỗ trợ đắc lực cho các bộ phận khác khi xảy ra TNLĐ, cháy nổ, sập đổ giàn giáo,…v.v. Những người của 3 bộ phận trên sẽ trực tiếp xử lý, thao tác, chữa cháy, sơ cứu người bị tai nạn. Như vậy, vai trò của 3 bộ phận này cũng rất quan trọng trong việc giảm nhẹ mức độ của tai nạn nếu xảy ra, góp phần bảo đảm an toàn tính mạng, sức khỏe, phương tiện, tài sản của người bị nạn, của doanh nghiệp và của lực lượng cứu nạn, cứu hộ.

4. KẾT LUẬN

Mô hình tổ chức bộ máy của hệ thống quản lý ATVSLĐ trong xây dựng ở Việt Nam lần đầu tiên được nghiên cứu và đề xuất áp dụng. Từng bộ phận trong hệ thống và mối quan hệ "hữu cơ" với nhau đã được phân tích tương đối cụ thể theo chức năng, nhiệm vụ, đồng thời tuân thủ các quy định của pháp luật. Có thể nhận thấy mô hình này có vai trò quan trọng trong công tác quản lý ATVSLĐ trong xây dựng vì thông qua đó, các yếu tố nguy hiểm và có hại dù xuất phát từ đâu trong quá trình thi công xây dựng đều được nhận dạng và ngăn ngừa từ sự phối hợp chặt chẽ của các bộ phận này. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình tổ chức bộ máy của hệ thống quản lý ATVSLĐ của nhà thầu tại một số dự án/công trình xây dựng cụ thể sẽ được phân tích và trình bày. Hy vọng kết quả nghiên cứu sẽ là nguồn tham khảo hữu ích cho các doanh nghiệp xây dựng tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Clayton Sinyai and Sang Choi. Fifteen years of American construction occupational safety and health research. Safety Science, Elsevier, vol. 131, no. 11, 2020.

[2] John Howard and Frank Hearl. Occupational Safety and Health in the USA: Now and the Future. Country Report, National Institute of Occupational Safety and Health, USA, pp. 80-83, 2012.

[3] Masahiro Hori. The Trend and Issues of Occupational Safety and Health in Japan. Proceeding of International Symposium on Safety Science and Engineering in China ISSSE-2012, pp. 610 - 614, 2012.

[4] Vigneshkumar Chellappa and Yan Luximon. Construction Safety Research in Hong Kong. Current Status and Future Scope. Proceedings of the 22nd Congress of the International Ergonomics Association, vol. 6, pp. 373 - 378, 2025.

[5] Nguyễn Lương Hải. Nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình thi công đến an toàn xây dựng tại Việt Nam. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2019, tập. 12, số. 4, tr. 66 - 74, 2019.

[6] Trần Hoàng Tuấn. Phân tích các nhân tố ảnh hưởng đến việc thực hiện an toàn lao động của công nhân xây dựng. Tạp chí khoa học, Trường Đại học Cần Thơ, tr. 162 - 170, 2009.

[7] Nguyễn Gia Hoàng. Đề xuất biện pháp kỹ thuật an toàn lao động trong thi công xây dựng trên đại bàn tỉnh Vĩnh Long. Luận văn thạc sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2016.

[8] Lê Văn Phùng, Nguyễn Địch và Trần Thị Tuyết. Khoa học quản lý. NXB. Thông tin và Truyền thông, 2014.

[9] Bùi Mạnh Hùng và Bùi Việt Thi. Khoa học quản lý. NXB. Xây dựng, 2023.

[10] Bùi Ngọc Toàn (2013). Khoa học quản lý trong xây dựng. NXB. Giao thông vận tải.

[11] Quốc hội. Luật An toàn, vệ sinh lao động số 84/2015/QH13, 2015.

[12] Chính phủ. Nghị định số 06/2021/NĐ-CP ngày 26/01/2021 quy định chi tiết một số nội dung về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng, 2021.

[13] Bộ Xây dựng. Thông tư số 10/2021/TT-BXD ngày 25/8/2021 hướng dẫn một số điều và biện pháp thi hành Nghị định số 06/2021/NĐ-CP, 2021.

[14] Nguyễn Thanh Việt và Hồ Ngọc Việt. Xây dựng khung đánh giá sự quản lý an toàn lao động trên các công trường xây dựng tại TP.HCM. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM, số 53A, tr. 16-28, 2021.

[15] Đinh Tuấn Hải và Lê Anh Dũng. Phân tích các mô hình quản lý trong xây dựng, NXB. Xây dựng, 2014.

[16] Phạm Đăng Khoa. Nghiên cứu xây dựng và thử nghiệm hệ thống quản lý an toàn lao động trong xây dựng tại Việt Nam theo mô hình của Nhật Bản. Đề tài khoa học cấp Bộ, mã số RD 30-17, Trường Đại học Xây dựng Miền Trung, 2019.

[17] Bộ Xây dựng. Thông tư số 04/2017/TT-BXD ngày 30/3/2017 quy định về quản lý an toàn lao động trong thi công xây dựng công trình, 2017.

[18] Chính phủ. Nghị định số 39/2016/NĐ-CP ngày 15/5/2016 quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật An toàn, vệ sinh lao động, 2016.

[19] Bộ Y tế. Thông tư số 19/2016/TT-BYT ngày 30/6/2016 hướng dẫn quản lý vệ sinh lao động và sức khỏe người lao động, 2016.

[20] Quốc hội. Luật Phòng cháy, chữa cháy và cứu nạn, cứu hộ số 55/2024/QH15, 2024.

[21] Chính phủ. Nghị định số 28/2020/NĐ-CP ngày 01/3/2020 quy định xử phạt vi phạm hành chính trong lĩnh vực lao động, bảo hiểm xã hội, đưa người lao động Việt Nam đi làm việc ở nước ngoài theo hợp đồng, 2020.

[22] Quốc hội. Bộ luật Hình sự số 100/2015/QH13, được sửa đổi, bổ sung năm 2017, 2015.

■Ngày nhận bài: 15/9/2026 ■Ngày sửa bài: 05/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 13/10/2026

Thu hút khu vực tư nhân đầu tư TOD gắn với đường sắt đô thị: Kinh nghiệm quốc tế và hàm ý chính sách cho Việt Nam

Attracting private sector investment in transit-oriented development (TOD) around urban rail: International experience and policy implications for Vietnam

> PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI[1], THS PHẠM THÚY HƯỜNG[2,*]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM
[*]Corresponding author: Email: huongpt@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Phát triển đường sắt đô thị (ĐSĐT) đòi hỏi vốn đầu tư lớn, thời gian thu hồi dài và khó bảo đảm hiệu quả tài chính nếu chỉ dựa vào doanh thu vận tải. Trong bối cảnh ngân sách nhà nước hạn chế, huy động khu vực tư nhân thông qua phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (Transit-Oriented Development - TOD) là một hướng tiếp cận có tiềm năng. Bài viết phân tích cơ chế thu hút tư nhân đầu tư TOD gắn với ĐSĐT thông qua nghiên cứu trường hợp Hồng Kông, Nhật Bản, Singapore và Trung Quốc. Trên cơ sở phương pháp nghiên cứu trường hợp so sánh, bài viết xem xét mối quan hệ giữa đầu tư ĐSĐT, gia tăng giá trị đất, phát triển bất động sản, thu hồi giá trị gia tăng từ đất (Land Value Capture - LVC), hợp tác công - tư (Public - Private Partnership - PPP) và mô hình Rail+Property. Kết quả cho thấy khả năng thu hút tư nhân phụ thuộc chủ yếu vào việc Nhà nước tạo lập quyền phát triển, tích hợp quy hoạch giao thông với sử dụng đất, phân bổ rủi ro hợp lý và thiết lập cơ chế chia sẻ giá trị gia tăng do ĐSĐT tạo ra. Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất mô hình kết hợp TOD-LVC-PPP-Rail+Property phù hợp với Việt Nam, trong đó Nhà nước giữ vai trò kiến tạo về quy hoạch, đất đai và thể chế; khu vực tư nhân đầu tư, khai thác các cấu phần tạo doanh thu; một phần giá trị gia tăng từ TOD được thu hồi và tái đầu tư cho ĐSĐT.

Từ khóa: TOD; đường sắt đô thị; đầu tư tư nhân; PPP; thu hồi giá trị đất.

ABSTRACT

Urban rail development requires substantial capital investment, long payback periods, and often faces difficulties in achieving financial viability when relying solely on farebox revenue. In the context of constrained public budgets, mobilizing private sector participation through Transit-Oriented Development (TOD) represents a potentially effective approach. This study examines mechanisms for attracting private investment in TOD associated with urban rail through comparative case studies of Hong Kong, Japan, Singapore, and China. Using a comparative case study approach, the paper analyzes the relationships among urban rail investment, land value appreciation, real estate development, Land Value Capture (LVC), Public-Private Partnerships (PPP), and the Rail+Property model. The findings indicate that the ability to attract private investment depends primarily on the government's capacity to establish development rights, integrate transport and land-use planning, allocate risks appropriately, and create mechanisms for sharing the land value increments generated by urban rail investment. Based on these findings, the paper proposes an integrated TOD-LVC-PPP-Rail+Property model for Vietnam, in which the government plays an enabling role in planning, land management, and institutional development; the private sector invests in and operates revenue-generating components; and a portion of the value created through TOD is captured and reinvested in urban rail development.

Keywords: Transit-Oriented Development (TOD); urban rail; private sector investment; public-private partnership (PPP); land value capture (LVC).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

ĐSĐT là cấu phần quan trọng trong phát triển hệ thống giao thông bền vững tại các đô thị lớn, có khả năng vận chuyển khối lượng hành khách lớn, giảm ùn tắc, hạn chế phụ thuộc vào phương tiện cá nhân và góp phần tái cấu trúc không gian đô thị. Tuy nhiên, ĐSĐT đòi hỏi nguồn vốn đầu tư rất lớn cho xây dựng, giải phóng mặt bằng, phương tiện, hệ thống điều khiển và vận hành, trong khi doanh thu từ vận tải hành khách thường khó đủ để bảo đảm hiệu quả tài chính của toàn dự án [1, 6].

Một đặc điểm quan trọng là lợi ích của ĐSĐT không chỉ thể hiện qua doanh thu vé mà còn lan tỏa sang thị trường đất đai và bất động sản. Khi tuyến đường sắt được đầu tư và đưa vào khai thác, khả năng tiếp cận khu vực quanh nhà ga được cải thiện, làm gia tăng giá trị sử dụng và giá trị thương mại của đất. Nếu phần giá trị gia tăng này được khai thác và phân bổ hợp lý, nó có thể trở thành nguồn lực bổ sung để hỗ trợ đầu tư ĐSĐT [5, 6, 7].

Trên cơ sở đó, TOD được hình thành như một mô hình tích hợp giữa phát triển giao thông và phát triển đô thị. ĐSĐT cải thiện khả năng tiếp cận, khả năng tiếp cận làm gia tăng giá trị đất, giá trị đất tạo động lực phát triển bất động sản, còn phát triển bất động sản tạo thêm nguồn thu và nguồn lực cho hệ thống giao thông. Trong thực tiễn quốc tế, Hồng Kông nổi bật với mô hình Rail+Property; Nhật Bản kết hợp kinh doanh đường sắt với phát triển đô thị và bất động sản; Singapore nhấn mạnh vai trò của Nhà nước trong quy hoạch tích hợp và quản lý đất đai; trong khi Trung Quốc triển khai TOD với quy mô lớn và sử dụng nhiều hình thức khai thác giá trị đất [6, 7].

Tại Việt Nam, Hà Nội và TP.HCM đang có nhu cầu mở rộng nhanh mạng lưới ĐSĐT, trong khi khả năng huy động nguồn lực ngoài ngân sách, đặc biệt vốn tư nhân, vẫn còn nhiều hạn chế. Các nghiên cứu gần đây cho thấy ĐSĐT có tác động đến giá trị đất và Hà Nội có tiềm năng áp dụng LVC. Vì vậy, vấn đề đặt ra không chỉ là phát triển TOD mà quan trọng hơn là thiết kế cơ chế để giá trị kinh tế do TOD tạo ra trở thành động lực thu hút khu vực tư nhân tham gia đầu tư ĐSĐT [2, 8].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung trả lời hai câu hỏi: (i) Các đô thị quốc tế sử dụng những cơ chế nào để thu hút khu vực tư nhân đầu tư TOD gắn với ĐSĐT? và (ii) Những yếu tố nào có thể vận dụng phù hợp với điều kiện thể chế, đất đai và thị trường của Việt Nam?

2. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VỀ THU HÚT KHU VỰC TƯ NHÂN ĐẦU TƯ TOD GẮN VỚI ĐSĐT

2.1. Hồng Kông: Mô hình Rail+Property và cơ chế chia sẻ giá trị đất

Hồng Kông là trường hợp điển hình về kết hợp đầu tư ĐSĐT với phát triển bất động sản thông qua mô hình Rail+Property. Doanh nghiệp đường sắt không chỉ khai thác doanh thu vận tải mà còn tham gia phát triển bất động sản tại các khu vực quanh nhà ga. Nhờ đó, giá trị gia tăng của đất và bất động sản do cải thiện khả năng tiếp cận bằng ĐSĐT được chuyển hóa một phần thành nguồn lực tài chính cho hệ thống đường sắt [4, 5].

Cơ chế này dựa trên mối quan hệ tương hỗ giữa giao thông và phát triển đô thị: đầu tư đường sắt làm tăng khả năng tiếp cận, thúc đẩy giá trị đất và phát triển thương mại, nhà ở, văn phòng, dịch vụ; ngược lại, nguồn thu từ bất động sản hỗ trợ đầu tư và vận hành ĐSĐT. Nhà nước giữ vai trò quan trọng trong quy hoạch, quản lý đất đai và tạo lập điều kiện phát triển, trong khi doanh nghiệp tham gia đầu tư và khai thác các dự án tạo doanh thu [4, 5, 6].

Kinh nghiệm Hồng Kông cho thấy hiệu quả Rail+Property phụ thuộc vào sự tích hợp giữa quy hoạch giao thông, sử dụng đất và phát triển bất động sản. Đây là cơ sở quan trọng để Việt Nam nghiên cứu kết hợp Rail+Property với cơ chế thu hồi giá trị gia tăng từ đất (LVC) [4, 5].

2.2. Nhật Bản: Doanh nghiệp đường sắt tư nhân gắn với phát triển đô thị

Nhật Bản nổi bật với mô hình doanh nghiệp đường sắt tư nhân kết hợp kinh doanh vận tải với phát triển đô thị và bất động sản. Các doanh nghiệp không chỉ cung cấp dịch vụ đường sắt mà còn đầu tư vào nhà ở, trung tâm thương mại, bán lẻ, khách sạn và dịch vụ dọc hành lang tuyến [1, 5].

Cơ chế tạo giá trị nằm ở sự liên kết giữa mở rộng mạng lưới đường sắt, phát triển đô thị và gia tăng nhu cầu đi lại. Khi giao thông cải thiện, dân cư và hoạt động kinh tế phát triển, làm tăng hành khách và doanh thu vận tải; đồng thời doanh nghiệp thu được nguồn thu từ bất động sản và dịch vụ. Nhờ tham gia vào nhiều khâu của chuỗi giá trị, doanh nghiệp có động lực đầu tư dài hạn vào hạ tầng [5, 6].

Bài học đối với Việt Nam không phải sao chép mô hình doanh nghiệp đường sắt tư nhân, mà là tạo cơ chế liên kết giữa ĐSĐT, phát triển đô thị và các hoạt động kinh doanh tạo doanh thu, phù hợp với điều kiện đất đai và thị trường trong nước.

2.3. Singapore: Nhà nước kiến tạo và tích hợp quy hoạch giao thông - đô thị

Singapore thể hiện mô hình Nhà nước giữ vai trò trung tâm trong quy hoạch không gian, quản lý đất đai và phát triển đô thị gắn với giao thông công cộng. TOD được triển khai đồng bộ với quy hoạch mạng lưới giao thông, sử dụng đất, mật độ xây dựng và phát triển các khu vực quanh nhà ga [6].

Điểm nổi bật là Nhà nước chủ động định hướng sử dụng đất và tổ chức không gian phát triển, qua đó tạo điều kiện hình thành các khu thương mại, văn phòng, nhà ở và dịch vụ gắn với ĐSĐT. Nhà nước không nhất thiết trực tiếp đầu tư toàn bộ các cấu phần mà chủ yếu tạo lập khung quy hoạch, pháp lý và đất đai ổn định để khu vực tư nhân tham gia dài hạn [6].

Bài học quan trọng đối với Việt Nam là cần chuyển từ phát triển ĐSĐT đơn thuần sang tích hợp giao thông với sử dụng đất và phát triển đô thị. Quy hoạch đồng bộ có thể tạo lập giá trị phát triển ngay từ giai đoạn chuẩn bị dự án và nâng cao khả năng thu hút vốn tư nhân.

2.4. Trung Quốc: Phát triển TOD quy mô lớn nhưng hiệu quả không đồng nhất

Trung Quốc triển khai TOD với quy mô lớn tại nhiều thành phố, kết hợp ĐSĐT với phát triển đô thị, thương mại và bất động sản quanh nhà ga. Nhà nước giữ vai trò lớn trong quy hoạch và quản lý đất đai, đồng thời sử dụng nhiều cơ chế để huy động nguồn lực cho hạ tầng và phát triển đô thị. Phát triển bất động sản và khai thác giá trị đất trong một số trường hợp được sử dụng để hỗ trợ đầu tư giao thông công cộng. [6]

Tuy nhiên, quy mô đầu tư lớn không đồng nghĩa với hiệu quả TOD đồng đều. Phát triển bất động sản vượt nhu cầu, thiếu kết nối giao thông hoặc phụ thuộc quá mức vào tăng giá đất có thể làm gia tăng rủi ro tài chính và thị trường. Vì vậy, bài học đối với Việt Nam là cần gắn quy mô TOD với nhu cầu thực tế, khả năng hấp thụ của thị trường và hiệu quả vận tải, thay vì chỉ tập trung vào khai thác quỹ đất [6].

2.5. So sánh và bài học kinh nghiệm cho Việt Nam

Bốn trường hợp quốc tế cho thấy không tồn tại một mô hình duy nhất để thu hút khu vực tư nhân đầu tư TOD gắn với ĐSĐT. Sự khác biệt chủ yếu nằm ở mức độ tham gia của Nhà nước, quyền kiểm soát đất đai, cơ chế phân bổ giá trị gia tăng và mô hình kinh doanh của doanh nghiệp đường sắt [1, 4, 5, 6].

Bảng 1. Bài học kinh nghiệm

Quốc gia/khu vực	Cơ chế chủ yếu	Vai trò nhà nước	Vai trò tư nhân	Bài học chính
Hồng Kông	Rail+Property, LVC	Quy hoạch, đất đai, tạo quyền phát triển	Đường sắt và phát triển bất động sản	Gắn đầu tư đường sắt với khai thác giá trị đất
Nhật Bản	Đường sắt + đô thị + bất động sản	Tạo khung thể chế và quy hoạch	Đầu tư, vận tải, bất động sản, thương mại	Tạo hệ sinh thái kinh doanh quanh đường sắt
Singapore	TOD tích hợp	Quy hoạch, đất đai, điều phối phát triển	Phát triển các dự án đô thị	Nhà nước kiến tạo để giảm rủi ro đầu tư
Trung Quốc	TOD quy mô lớn, khai thác đất	Quy hoạch và quản lý đất đai	Đầu tư hạ tầng và bất động sản	Cần kiểm soát rủi ro thị trường và quy mô phát triển

Nguồn: Tác giả tổng hợp và phân tích

Từ kinh nghiệm quốc tế, Việt Nam có thể rút ra bốn bài học: (i) đa dạng hóa nguồn thu ngoài vé thông qua bất động sản, thương mại và dịch vụ quanh nhà ga; (ii) tích hợp quy hoạch giao thông với sử dụng đất để tạo lập quyền phát triển và gia tăng giá trị TOD; (iii) thiết kế cơ chế LVC minh bạch, ổn định và hài hòa lợi ích; (iv) phân bổ rủi ro cho chủ thể có khả năng kiểm soát tốt nhất. [1, 4, 6, 7].

Do đó, Việt Nam không nên sao chép một mô hình cụ thể mà cần **kết hợp linh hoạt TOD-LVC-PPP-Rail+Property** phù hợp với điều kiện đất đai, thể chế và thị trường trong nước.

3. THỰC TRẠNG VÀ NHỮNG VẤN ĐỀ ĐẶT RA TẠI VIỆT NAM

3.1. Tiềm năng khai thác giá trị đất quanh ĐSĐT

Việt Nam, đặc biệt là Hà Nội và TP.HCM, có tiềm năng phát triển TOD gắn với ĐSĐT. Việc đầu tư tuyến và nhà ga không chỉ nâng cao năng lực vận tải mà còn cải thiện khả năng tiếp cận, thúc đẩy thay đổi sử dụng đất và gia tăng hoạt động kinh tế tại khu vực xung quanh [2, 8].

Khi khả năng tiếp cận được cải thiện, giá trị đất và nhu cầu phát triển bất động sản có thể gia tăng. Đây là cơ sở kinh tế của cơ chế LVC, theo đó một phần giá trị gia tăng từ đất có thể được thu hồi thông qua các công cụ tài chính, đất đai hoặc hợp tác đầu tư để hỗ trợ phát triển ĐSĐT và hạ tầng TOD [2, 7, 8].

Tuy nhiên, giá trị gia tăng không tự động trở thành nguồn lực tài chính cho ĐSĐT. Điều kiện quan trọng là phải có cơ chế xác định, phân bổ và thu hồi giá trị minh bạch, đồng thời bảo đảm lợi ích hợp lý cho Nhà nước và nhà đầu tư [6, 7].

3.2. Những hạn chế trong huy động nguồn lực tư nhân

Mặc dù có tiềm năng lớn, việc thu hút tư nhân đầu tư ĐSĐT và phát triển khu vực quanh nhà ga còn hạn chế. Trước hết, quy hoạch giao thông và sử dụng đất chưa được tích hợp đầy đủ, khiến việc xác định không gian TOD, mật độ phát triển và quyền phát triển còn thiếu đồng bộ [1, 3, 4].

Thứ hai, cơ chế khai thác và phân bổ giá trị đất chưa rõ ràng. Giá trị gia tăng do đầu tư hạ tầng chưa được kết nối hiệu quả với nguồn vốn ĐSĐT, trong khi sự thiếu ổn định về quyền phát triển, nghĩa vụ tài chính và cơ chế LVC làm gia tăng tính bất định đối với nhà đầu tư [3, 6, 7].

Thứ ba, dự án ĐSĐT và bất động sản có vốn đầu tư lớn, thời gian hoàn vốn dài và chịu nhiều rủi ro về nhu cầu vận tải, thị trường, pháp lý và giải phóng mặt bằng. Nếu phần lớn rủi ro được chuyển sang tư nhân mà không có cơ chế chia sẻ phù hợp, chi phí vốn sẽ tăng và khả năng tham gia giảm. Do đó, cần nâng cao tính minh bạch trong lựa chọn nhà đầu tư, phân chia lợi ích và kiểm soát rủi ro [1, 3].

3.3. Đề xuất mô hình TOD-LVC-PPP-Rail+Property cho Việt Nam

Trên cơ sở kinh nghiệm quốc tế, bài viết đề xuất kết hợp TOD, LVC, PPP và Rail+Property thành một mô hình thống nhất, trong đó ĐSĐT, đất đai, phát triển bất động sản và nguồn vốn tư nhân được liên kết trong cùng một chuỗi giá trị [1, 3, 4].

Nhà nước giữ vai trò kiến tạo thông qua quy hoạch, quản lý đất đai, phát triển hạ tầng khung và hoàn thiện thể chế. Phạm vi TOD, chức năng sử dụng đất và mật độ phát triển cần được xác định ngay từ giai đoạn chuẩn bị dự án. Nhà nước đồng thời ưu tiên xử lý giải phóng mặt bằng và các hạ tầng thiết yếu nhằm giảm rủi ro ban đầu cho nhà đầu tư [3, 6].

Khu vực tư nhân được khuyến khích đầu tư vào các cấu phần tạo doanh thu như nhà ở, văn phòng, thương mại, dịch vụ, bãi đỗ xe và các khu phức hợp quanh nhà ga. Với các cấu phần hạ tầng phù hợp, PPP được lựa chọn trên cơ sở khả năng tạo doanh thu và mức độ rủi ro. Như vậy, tư nhân không chỉ cung cấp vốn mà còn tham gia phát triển và khai thác các tài sản thương mại [3, 4].

LVC là cơ chế kết nối giá trị gia tăng từ đất với nhu cầu vốn cho ĐSĐT. Một phần hợp lý của giá trị gia tăng do hạ tầng tạo ra cần được thu hồi và phân bổ minh bạch giữa Nhà nước, nhà đầu tư và các chủ thể liên quan, trong đó dành một phần để tái đầu tư cho ĐSĐT và TOD. Mức thu hồi cần phù hợp để không làm suy giảm động lực đầu tư tư nhân [3, 6, 7].

Rủi ro cần được phân bổ theo khả năng kiểm soát của mỗi bên. Nhà nước chịu trách nhiệm chủ yếu về quy hoạch, pháp lý, đất đai và giải phóng mặt bằng; tư nhân chịu trách nhiệm chính về xây dựng, phát triển và kinh doanh bất động sản; rủi ro về nhu cầu vận tải và thị trường được chia sẻ theo từng dự án [1, 3].

Bảng 2. Phân loại và phân bổ rủi ro chủ yếu

Loại rủi ro	Nhà nước	Khu vực tư nhân
Quy hoạch	Chủ yếu	Tham gia
Pháp lý, đất đai, GPMB	Chủ yếu	Hỗ trợ/chia sẻ
Xây dựng	Chia sẻ	Chủ yếu
Bất động sản, thương mại	Hỗ trợ, giám sát	Chủ yếu
Vận hành	Chia sẻ	Chủ yếu
Nhu cầu vận tải	Chia sẻ	Chia sẻ
Thị trường bất động sản	Điều tiết	Chủ yếu

Nguồn: Tác giả tổng hợp và phân tích

Mô hình TOD-LVC-PPP-Rail+Property không nhằm chuyển toàn bộ trách nhiệm đầu tư sang khu vực tư nhân mà hướng tới kết hợp hiệu quả nguồn lực công và tư. Nhà nước tạo lập giá trị thông qua quy hoạch, đất đai, hạ tầng và thể chế; tư nhân cung cấp vốn, năng lực phát triển và khai thác thương mại; LVC chuyển một phần giá trị gia tăng từ phát triển đô thị thành nguồn lực hỗ trợ ĐSĐT [1, 3, 4, 6].

Theo đó, chuỗi giá trị được hình thành theo hướng: ĐSĐT → cải thiện khả năng tiếp cận → gia tăng giá trị đất → phát triển bất động sản, dịch vụ → tạo doanh thu → thu hồi một phần giá trị gia tăng → tái đầu tư cho ĐSĐT và TOD. Cơ chế này có thể góp phần giảm áp lực ngân sách và tạo động lực dài hạn cho khu vực tư nhân tham gia phát triển ĐSĐT [5, 6, 7].

4. HÀM Ý CHÍNH SÁCH

Từ kinh nghiệm quốc tế và điều kiện Việt Nam, trước hết cần xác định TOD là một bộ phận của phương án đầu tư ĐSĐT, thay vì một hoạt động phát triển đô thị độc lập. Quy hoạch TOD cần được lập đồng thời với phương án huy động vốn và khai thác giá trị đất, qua đó đưa giá trị gia tăng từ phát triển đô thị trở thành một thành phần của cấu trúc tài chính dự án [1, 3, 6].

Cần xây dựng cơ chế LVC minh bạch, có khả năng dự báo, trong đó xác định rõ phương pháp đánh giá giá trị đất trước và sau đầu tư, phần giá trị gia tăng có thể thu hồi, nguyên tắc phân bổ và sử dụng nguồn thu cho ĐSĐT và TOD. Cơ chế này đồng thời phải bảo đảm lợi ích hợp lý để duy trì động lực đầu tư của khu vực tư nhân. Trong giai đoạn đầu, nên thí điểm Rail+Property tại các khu vực có điều kiện thuận lợi như ga đầu mối, quỹ đất phù hợp, nhu cầu thị trường và tiềm năng thương mại cao. Kết quả thí điểm là cơ sở hoàn thiện cơ chế trước khi mở rộng. Đồng thời, cần tăng quyền và năng lực khai thác nguồn thu ngoài vé cho doanh nghiệp ĐSĐT thông qua thương mại tại nhà ga, quảng cáo, dịch vụ, bãi đỗ xe và hợp tác phát triển bất động sản. Bên cạnh đó, cần thiết lập cơ chế phân bổ rủi ro theo khả năng kiểm soát. Nhà nước ưu tiên giảm các rủi ro về quy hoạch, pháp lý, đất đai và giải phóng mặt bằng; khu vực tư nhân tập trung vào xây dựng, kinh doanh và phát triển bất động sản. Các quyền phát triển TOD có giá trị kinh tế lớn cần được phân bổ thông qua cơ chế cạnh tranh, minh bạch và kiểm soát xung đột lợi ích. Đây là điều kiện để TOD trở thành công cụ huy động nguồn lực cho ĐSĐT thay vì chỉ là mô hình quy hoạch đô thị [6, 7, 8].

5. KẾT LUẬN

Thu hút khu vực tư nhân đầu tư TOD gắn với ĐSĐT có tiềm năng giải quyết đồng thời nhu cầu phát triển giao thông công cộng và huy động nguồn lực ngoài ngân sách. Kinh nghiệm Hồng Kông, Nhật Bản, Singapore và Trung Quốc cho thấy yếu tố quyết định không chỉ là huy động vốn tư nhân mà quan trọng hơn là tạo lập, khai thác và phân phối giá trị do ĐSĐT tạo ra. Đối với Việt Nam, cần chuyển từ tư duy "Nhà nước đầu tư ĐSĐT, tư nhân phát triển bất động sản xung quanh" sang "Nhà nước và tư nhân cùng tạo lập, khai thác và chia sẻ giá trị của TOD". Nhà nước giữ vai trò kiến tạo về quy hoạch, đất đai, thể chế và giảm rủi ro chính sách; khu vực tư nhân tham gia đầu tư và khai thác các cấu phần sinh lợi; doanh nghiệp ĐSĐT được mở rộng nguồn thu ngoài vận tải; một phần giá trị gia tăng từ TOD được thu hồi và tái đầu tư cho ĐSĐT. Mô hình TOD-LVC-PPP-Rail+Property có thể là khung tham khảo phù hợp để Việt Nam từng bước huy động vốn tư nhân cho ĐSĐT. Tuy nhiên, cần triển khai theo lộ trình thí điểm - đánh giá - hoàn thiện thể chế - mở rộng, phù hợp với điều kiện đất đai, thị trường và năng lực quản trị trong nước. [1, 3, 4, 6].

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Giao thông vận tải và Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM đã tạo điều kiện thuận lợi trong quá trình thực hiện nghiên cứu và hoàn thiện bài báo. Nhóm tác giả đồng thời xin cảm ơn những ý kiến trao đổi chuyên môn và sự hỗ trợ về tài liệu tham khảo, góp phần nâng cao chất lượng và hoàn thiện nội dung nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chang, Z., & Phang, S.-Y. Urban rail transit PPPs: Lessons from East Asian cities. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 105, pp. 106-122, 2017, https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.08.015.

[2] Property value capture for development of mass rapid transit: Case study from Hanoi. Asian Transport Studies, vol. 8, p. 100084, 2022, https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2022.100084.

[3] Li, X., & Love, P. E. D. Procuring urban rail transit infrastructure by integrating land value capture and public-private partnerships: Learning from the cities of Delhi and Hong Kong. Cities, vol. 112, 2021.

[4] Wong, K. Y., & Seetharam, K. E. Unleashing the Full Potential of Private Participation in Railway Development in Developing Asia: Perspective from the Rail-Plus-Property Model. Asian Development Bank Institute, 2024, https://doi.org/10.56506/RYAR4981.

[5] Murakami, J. Transit Value Capture: New Town Co-Development Models and Land Market Updates in Tokyo and Hong Kong, Lincoln Institute of Land Policy, 2012.

[6] Suzuki, H., Murakami, J., Hong, Y.-H., & Tamayose, B. Financing Transit-Oriented Development with Land Values: Adapting Land Value Capture in Developing Countries, World Bank, 2015.

[7] Medda, F. Land value capture finance for transport accessibility: A review. Journal of Transport Geography, vol. 25, pp. 154-161, 2012.

[8] Doan, Q. C., Wang, M., & Zhang, X. The impact of delayed urban rail projects on land prices in Hanoi, Vietnam. Transport Policy, vol. 187, p. 104277, 2026, https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104277.

■Ngày nhận bài 26/9/2026 ■Ngày sửa bài: 02/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/10/2026

Nhân tố ảnh hưởng tới công tác quản lý đấu thầu trong dự án đầu tư xây dựng công trình thủy lợi: Tổng quan hệ thống kết hợp trắc lượng thư mục

Factors affecting tendering management in hydraulic works construction investment projects: A systematic review combined with bibliometric analysis

> NGUYỄN THỊ THỦY[1,*], PGS.TS LÊ VĂN CHÍNH[2], PGS.TS NGUYỄN QUỐC TOÀN[3]
[1]NCS Ngành Quản lý xây dựng, Trường Đại học Thủy lợi
[2]Trường Đại học Thủy lợi
[3]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: ntthuy@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo hệ thống hóa các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý đấu thầu trong các dự án đầu tư xây dựng công trình thủy lợi từ góc độ chủ đầu tư. Do số lượng nghiên cứu chuyên biệt về lĩnh vực thủy lợi còn hạn chế, nghiên cứu trước hết tổng quan các gói thầu xây lắp nói chung, sau đó tập trung phân tích các công trình thủy lợi. Phương pháp nghiên cứu kết hợp trắc lượng thư mục trên 4.046 bản ghi Scopus với tổng quan hệ thống theo PRISMA 2020. Nguồn tài liệu toàn văn được lựa chọn có chủ đích; trong đó, 139 nguồn được đánh giá và 69 nguồn nghiên cứu từ góc độ chủ đầu tư được đưa vào bảng thống kê tần suất. Các bài báo đăng trên tạp chí chuyên ngành nước và thủy lợi chỉ chiếm 1,8% tập dữ liệu. Tổng quan nhận diện mười tám nhóm nhân tố, trong đó nhiều nhóm có chiều hướng tác động khác nhau giữa các nghiên cứu; đồng thời, tích hợp bốn lý thuyết nền tảng thành một chuỗi giải thích, với vai trò trung gian của mức độ cạnh tranh được đề xuất như một giả thuyết nghiên cứu. Bài báo chỉ ra năm khoảng trống nghiên cứu và đề xuất định hướng cho các nghiên cứu định lượng tiếp theo.

Từ khóa: Quản lý đấu thầu; công trình thủy lợi; nhân tố ảnh hưởng; gói thầu xây lắp; tổng quan hệ thống; trắc lượng thư mục.

ABSTRACT

This paper systematizes the factors affecting tendering management in hydraulic works construction investment projects from the client perspective. As the hydraulic-specific literature is thin, the review covers construction work packages in general and then focuses on hydraulic works. Bibliometric analysis of 4,046 Scopus records is combined with a PRISMA 2020 systematic review; full-text sources were selected purposively, 139 were assessed and 69 client-perspective sources entered the frequency table. Papers in water-sector journals account for only 1.8% of the dataset. Eighteen factor groups were identified, many with directions of effect that differ across studies, and four core theories are integrated into one explanatory chain in which the mediating role of competition is proposed as a hypothesis. Five research gaps and directions for quantitative research are presented.

Keywords: Tendering management; hydraulic works; influencing factors; construction work package; systematic review; bibliometric analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đấu thầu quyết định chất lượng đầu vào của dự án đầu tư xây dựng và ràng buộc tiến độ, chi phí, chất lượng ở các khâu sau. Tại Việt Nam, khung pháp lý về lựa chọn nhà thầu thay đổi liên tục: Luật Đấu thầu số 22/2023/QH15 chỉ trong hai năm đã được sửa đổi, bổ sung bởi năm luật; nội dung hiện hành được hợp nhất tại Văn bản hợp nhất số 74/VBHN-VPQH ngày 25/3/2026 [1]. Nghị định số 214/2025/NĐ-CP [2] thay thế Nghị định số 24/2024/NĐ-CP, trong năm 2026 được sửa đổi ba lần, bởi các Nghị định số 165/2026/NĐ-CP, 170/2026/NĐ-CP ngày 15/5/2026 và Nghị định số 349/2026/NĐ-CP [3].

Ở phạm vi cả nước, tỷ lệ tiết kiệm qua lựa chọn nhà thầu đạt 4,34% năm 2024 và 6,93% năm 2025, nhưng năm 2025 chỉ định thầu vẫn

chiếm 78,35% số gói thầu [4]. Để đánh giá riêng lĩnh vực thủy lợi, từ tệp 189.368 gói xây lắp có nhà thầu trúng thầu trích từ Hệ thống mạng đấu thầu quốc gia [5], nghiên cứu lọc các gói phát hành từ 01/01/2024 tới 30/6/2026, đấu thầu rộng rãi trong nước qua mạng, một giai đoạn một túi hồ sơ, khai loại công trình thủy lợi hoặc đê điều, còn 4.066 gói; tỷ lệ tiết kiệm tính bằng 1 trừ tỷ số giá trúng thầu trên giá gói thầu. Kết quả cho thấy 69,6% số gói chỉ có một nhà thầu nộp hồ sơ, và tỷ lệ tiết kiệm trung vị ở các gói này chỉ 0,40% so với 4,66% ở các gói có từ hai nhà thầu. Vì loại công trình do chủ đầu tư tự khai, một phần gói thủy lợi bị bỏ sót (19 trong 111 gói đã tra tay được khai loại khác); và vì tệp không gồm gói bị hủy, mức thiếu cạnh tranh thực tế có thể còn cao hơn.

Xét theo góc nhìn, văn liệu về đấu thầu xây dựng có thể chia thành hai hướng chính: hướng nhìn từ phía nhà thầu, tập trung vào quyết định dự thầu và giá dự thầu [6]; và hướng nhìn từ phía chủ đầu tư, bàn về tiêu chí lựa chọn, sơ tuyển và tổ chức lựa chọn nhà thầu [7, 8]. Bài báo tiếp cận theo hướng thứ hai, trong đó, dựa trên trách nhiệm của chủ đầu tư theo Luật Đấu thầu [1], công tác quản lý đấu thầu được hiểu là việc chủ đầu tư phê duyệt kế hoạch, chuẩn bị và tổ chức lựa chọn nhà thầu, ký kết hợp đồng và chịu trách nhiệm về kết quả; sáu khâu của quá trình lựa chọn nhà thầu là đối tượng được quản lý. Văn liệu riêng về công trình thủy lợi còn mỏng, nên tổng quan bao quát gói thầu xây lắp nói chung rồi tập trung vào công trình thủy lợi, qua bốn câu hỏi về quy mô văn liệu, các nhóm nhân tố và chiều tác động, lý thuyết giải thích sự không nhất quán, và khoảng trống.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

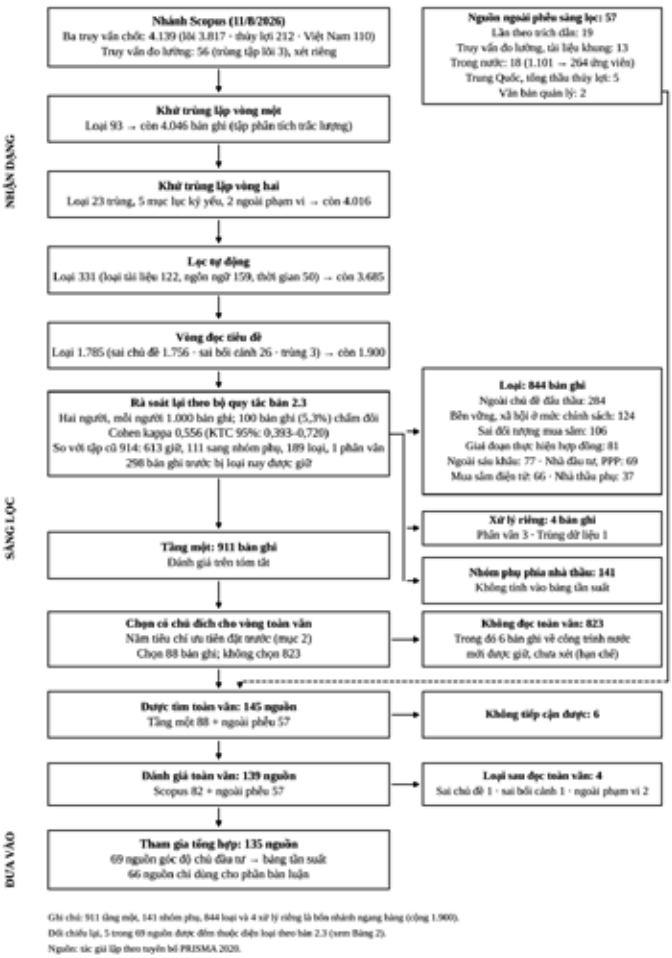
Nghiên cứu kết hợp phân tích trắc lượng thư mục với tổng quan hệ thống theo PRISMA 2020 [9]; đề cương không được đăng ký trước trên PROSPERO hoặc OSF, chuỗi truy vấn, tiêu chí và nhật ký sàng lọc được lưu trong tiểu luận tổng quan của luận án và cung cấp theo yêu cầu. Dữ liệu Scopus thu ngày 11/8/2026 bằng ba truy vấn chốt (lõi về đấu thầu xây dựng, công trình thủy lợi, bối cảnh Việt Nam) và một truy vấn bổ sung về đo lường kết quả mua sắm công; khử trùng lặp vòng một còn 4.046 bản ghi làm tập trắc lượng, vòng hai còn 4.016 bản ghi đi vào sàng lọc (Hình 1). Trắc lượng dùng gói bibliometrix [10] cho phân tích hiệu suất; phần ánh xạ cấu trúc chủ đề không được dùng để diễn giải vì modularity của mạng từ khóa dưới ngưỡng 0,3 [11] (Bảng 1).

Tài liệu được chọn khi nghiên cứu gói thầu thi công xây lắp, có nội dung thuộc sáu khâu của quá trình lựa chọn nhà thầu, là bài tạp chí, bài hội nghị, sách hoặc chương sách, viết bằng tiếng Anh hoặc tiếng Việt và công bố từ 1988 tới 2026; sau lọc tự động và đọc tiêu đề, còn lại 1.900 bản ghi. Hai vòng đọc tiêu đề và tóm tắt có dùng công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh (Claude, Anthropic) để đề xuất, quyết định cuối thuộc về người sàng lọc; vì cả hai người đều thấy gợi ý trước khi quyết định, mức đồng thuận đo được có thể bị thổi phồng.

Để kiểm tra độ tin cậy, người sàng lọc thứ hai chấm độc lập một mẫu phân tầng 288 bản ghi rút từ cả hai vòng đọc tiêu đề và tóm tắt. Mức đồng thuận thấp (Cohen kappa 0,236; PABAK [12] 0,236; Gwet AC1 [13] 0,268), và khi phân xử, tỷ lệ phân loại sai trong nhóm đã giữ lên tới 34,7% ở vòng tiêu đề và 54,2% ở vòng tóm tắt. Bộ quy tắc phân định vì vậy được viết lại theo hướng nới rộng: xét rộng hơn loại gói thầu, chấp nhận nghiên cứu mua sắm trong xây dựng không nêu rõ khâu, và giữ riêng nhóm nghiên cứu nhìn từ phía nhà thầu. Vì việc sửa diễn ra sau khi đã biết kết quả, nghiên cứu khai báo đây là điều chỉnh đề cương. Toàn bộ 1.900 bản ghi được sàng lại theo bộ quy tắc sửa đổi (bản 2.3), trong đó 100 bản ghi (5,3%) được hai người chấm độc lập và đạt kappa 0,556 (KTC 95%: 0,393 - 0,720); do hai lần đo khác mẫu và thiết kế, mức cải thiện này chỉ là kết quả sơ bộ.

Kết quả sàng lại gồm 911 bản ghi được giữ (tầng một), 141 bản ghi nhóm phụ phía nhà thầu không tính vào bảng tần suất, 844 bị loại và 4 xử lý riêng; so với lần sàng đầu, 298 bản ghi trước bị loại nay được giữ, tức tiêu chí đã nới thêm gần một phần ba (Hình 1).

Nguồn vào vòng toàn văn được chọn có chủ đích theo năm tiêu chí ưu tiên đặt trước: toàn bộ bài về công trình thủy lợi và công trình nước; toàn bộ bài ở bối cảnh Việt Nam; ba tới năm bài mạnh nhất mỗi cụm chủ đề; cỡ mẫu từ 150 trở lên; hoặc từ 50 lượt trích dẫn trở lên. Từ tầng một chọn 88 bản ghi; cộng 57 nguồn (41%) nhận dạng ngoài phễu sàng lọc chính, có 145 nguồn được tìm và 139 nguồn tiếp cận được. Sau khi đọc, 4 nguồn bị loại; 135 nguồn tham gia tổng hợp, trong đó 69 nguồn ở góc độ chủ đầu tư được đưa vào bảng tần suất và 66 nguồn chỉ dùng cho phần bàn luận (Hình 1).



Ghi chú: 911 tầng một, 141 nhóm phụ, 844 loại và 4 xử lý riêng là bốn nhánh ngang hàng (cộng 1.900).
Đối chiếu lại, 5 trong 69 nguồn được đếm thuộc diện loại theo bản 2.3 (xem Bảng 2).
Nguồn: tác giả lập theo tuyên bố PRISMA 2020.

Hình 1. Sơ đồ PRISMA 2020 của quá trình nhận dạng và sàng lọc tài liệu

Chất lượng từng nguồn được chấm trên thang mười điểm do nghiên cứu sinh xây dựng từ các tiêu chí của MMAT [14]; vì tác giả MMAT khuyến cáo không quy về một điểm tổng, điểm này chỉ dùng cho phân tích độ nhạy; 69 nguồn được đếm có điểm từ 4 tới 8, trung vị 6. Nghiên cứu không gộp cỡ tác động mà tổng hợp theo số nguồn và chiều tác động được báo cáo [15], kèm hai phân tích độ nhạy: loại nguồn dưới 5 điểm (chỉ một nguồn, thứ hạng hầu như không đổi); và rút 5 nguồn nay thuộc diện loại theo bộ quy tắc sửa đổi (Bảng 2).

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Quy mô và phân bố văn liệu

Văn liệu tăng nhanh và tập trung ở các tạp chí quản lý xây dựng, trong khi không tạp chí ngành nước nào nằm trong vùng lõi Bradford (Bảng 1).

Bảng 1. Chỉ số trắc lượng cốt lõi của tập 4.046 bản ghi

Chỉ số	Giá trị
Khoảng thời gian; số nguồn; số tác giả	1969 - 2027 (tập trước lọc năm; 2027 là bài in trước); 1.447 nguồn; 8.084 tác giả
Trích dẫn trung bình mỗi tài liệu	18,78
Tăng trưởng kép 1995 - 2025; tỷ trọng 2016 - 2025	14,24%/năm; 55,5%
Bốn quốc gia dẫn đầu; Việt Nam	Trung Quốc 781, Hoa Kỳ 746, Anh 641, Australia 595 lượt; Việt Nam 127 lượt, hạng 12/104
Vùng lõi Bradford	28 nguồn, 1.357 bài (33,5%)
Mười nguồn đầu	20,2% số bài
Nguồn ngành nước và thủy lợi	44 nguồn, 74 bài (1,8%); không nguồn nào trong vùng lõi
Modularity mạng từ khóa (250 nút; 60 nút)	0,097; 0,050 (dưới ngưỡng 0,3)

Nguồn: Tác giả phân tích từ dữ liệu Scopus bằng gói bibliometrix

3.2. Mười tám nhóm nhân tố và chiều tác động

Từ 69 nguồn ở góc độ chủ đầu tư, nghiên cứu nhận diện mười tám nhóm nhân tố (Bảng 2); vì mẫu chọn có chủ đích, số nguồn chỉ mang tính mô tả mẫu, và một nguồn có thể thuộc nhiều nhóm (187 lượt đếm trên 69 nguồn). Khi rút 5 nguồn, không nhóm nào rơi xuống dưới ngưỡng ba nguồn và năm nhóm đầu vẫn giữ nguyên thành phần, dù thứ tự giữa N06, N13 và N07 thay đổi; N11 và N15 trở thành nhóm biên.

Bảng 2. Mười tám nhóm nhân tố nhận diện từ 69 nguồn được đếm trong mẫu toàn văn đã chọn

Mã	Nhóm nhân tố	Số nguồn	Rút 5 nguồn	Chiều tác động được báo cáo
N03	Tiêu chí đánh giá và trọng số	22	22	Không nhất quán: tiêu chí phi giá có lợi ở gói giá trị lớn, nhiều gói không đổi kết quả
N12	Tiêu chí năng lực và sơ tuyển	22	22	Hai chiều: sơ tuyển chặt nâng chất lượng lựa chọn nhưng giảm số nhà thầu
N06	Thể chế và pháp luật	16	14	Chất lượng thể chế thuận chiều; thay đổi quy định đơn lẻ không có ý nghĩa
N13	Số lượng nhà thầu tham dự	16	15	Thuận chiều với mức giảm giá (có điểm bão hòa); không ý nghĩa hoặc ngược chiều với chi phí sau hợp đồng
N07	Minh bạch, thông thầu, tham nhũng	15	15	Tham nhũng, thông thầu ngược chiều; giám sát, chế tài thuận chiều
N08	Giá gói thầu và độ chính xác dự toán	14	12	Dự toán kém ngược chiều (cản tham dự, làm sai lệch tỷ lệ tiết kiệm)
N02	Năng lực bên mời thầu và ban QLDA	13	11	Chủ yếu thuận chiều; một nguồn trái chiều về thời gian
N09	Phân chia gói thầu và quy mô gói	10	10	Không nhất quán theo thời điểm đo kết quả
N10	Hình thức và phương thức lựa chọn	10	9	Hình thức kém cạnh tranh ngược chiều (giá cao, kéo dài)
N01	Chất lượng hồ sơ mời thầu	9	9	HSMT tốt cùng chiều với thời gian, cạnh tranh, độ chính xác dự toán (nhất quán) [16]
N14	Thời gian và chậm trễ	9	8	Chủ yếu được đo như kết quả, chưa đo như nhân tố
N04	Phương pháp đánh giá hồ sơ dự thầu	8	8	Làm thay đổi thứ hạng và kết quả trúng thầu (nhất quán)
N16	Đặc điểm công trình thủy lợi	6	6	Chưa đo trực tiếp; tính đặc thù được xác nhận qua thang đo
N05	Tổ chuyên gia chấm thầu	4	4	Chưa đo trực tiếp với kết quả
N11	Loại hợp đồng	4	3	Trọn gói ổn định chi phí hơn đơn giá
N15	Đấu thầu qua mạng và công nghệ	4	3	Thuận chiều (giảm tham nhũng, tăng cạnh tranh); năng lực hệ thống hạn chế cản trở
N17	Năng lực nhà thầu thi công	4	4	Thuận chiều (nhà thầu năng lực thật giảm vượt chi phí)
N18	Ưu ái địa phương và rào cản gia nhập	1	1	Ngược chiều (một nguồn, chưa đủ căn cứ)

Ghi chú: cột "Rút 5 nguồn" là số nguồn sau khi bỏ 5 nguồn thuộc diện loại theo bộ quy tắc sửa đổi (còn 64 nguồn). Nguồn: Tác giả tổng hợp từ 69 nguồn được đếm

Chiều tác động của nhiều nhóm không nhất quán giữa các nghiên cứu: sơ tuyển chặt nâng chất lượng lựa chọn nhưng giảm số nhà thầu tham dự [7, 8]; tiêu chí phi giá có lợi ở gói giá trị lớn nhưng nhiều gói không đổi kết quả; quy mô gói chỉ ngược chiều với một trong ba khía cạnh hiệu quả [17]; còn số nhà thầu thuận chiều với mức giảm giá nhưng có điểm bão hòa và không có ý nghĩa với chi phí sau hợp đồng.

3.3. Cơ sở lý thuyết tích hợp

Để giải thích các kết quả trái chiều đó, nghiên cứu tích hợp bốn lý thuyết trụ thành một chuỗi cơ chế giả định. Theo lý thuyết thể chế [18], chất lượng môi trường thể chế quy định biên độ thiết kế cơ chế sàng lọc; khi quy định thay đổi liên tục, bên mời thầu có xu hướng sao chép mẫu hồ sơ an toàn, tức đẳng cấu mô phỏng [19], và sàng lọc mất khả năng phân biệt nhà thầu. Lý thuyết nguồn lực [20] vốn giải thích lợi thế của doanh nghiệp; áp cho chủ đầu tư công, năng lực quản lý đấu thầu được coi là nguồn lực quyết định chất lượng sàng lọc trong biên độ đó. Theo lý thuyết thông tin bất cân xứng [21], nhà thầu nắm thông tin về năng lực của mình, nên chủ đầu tư phải dùng cơ chế sàng lọc để phân biệt nhà thầu đủ năng lực. Theo lý thuyết đấu giá [22], số nhà thầu tăng kéo giá trúng thầu về gần chi phí thực, nhưng do lời nguyền người thắng [23], lợi ích này chỉ thành chất lượng lựa chọn khi sàng lọc đủ mạnh. Chuỗi thể chế và nguồn lực, tới sàng lọc, tới mức độ cạnh tranh, tới hiệu quả là giả thuyết cần kiểm định, không phải kết quả của tổng quan; nó giúp hiểu vì sao cùng một nhân tố có thể cho kết quả trái chiều tùy thành phần hiệu quả được đo. Trong chuỗi này, số nhà thầu tham dự (N13) không còn là một nhân tố ngang hàng mà được đặt lại thành biến trung gian.

3.4. Khoảng trống nghiên cứu và hàm ý cho công trình thủy lợi

Tổng quan chỉ ra năm khoảng trống nghiên cứu. Thứ nhất, về bối cảnh, công trình thủy lợi còn ít được nghiên cứu trong văn liệu đấu thầu: truy vấn thủy lợi chỉ cho 212 bản ghi so với 3.817 của truy vấn lõi, bài đăng trên tạp chí ngành nước chỉ chiếm 1,8% tập dữ liệu (Bảng 1), trong mẫu chỉ 6 nguồn đề cập đặc điểm công trình thủy lợi, và các nghiên cứu trong nước đều giới hạn ở một tỉnh hoặc một huyện.

Thứ hai, về phương pháp, văn liệu chủ yếu mô tả và xếp hạng, ít kiểm định quan hệ giữa nhân tố và kết quả. Trong 139 nguồn đã đọc toàn văn (tính cả 4 nguồn bị loại sau khi đọc), nhiều nhất là nghiên cứu tình huống (32) và ra quyết định đa tiêu chí (21); chỉ 3 nguồn ước lượng mô hình cấu trúc tuyến tính, không nguồn nào ở công trình thủy lợi, và nghiên cứu trong nước về thủy lợi dừng ở phân tích

nhân tố khẳng định [24]. Các nghiên cứu trong nước khác chủ yếu dùng bảng hỏi từ 160 tới 307 phiếu với phân tích nhân tố và hồi quy [25, 26]; riêng nghiên cứu tại Bạc Liêu dùng 432 quan sát và hồi quy FGLS với biến phụ thuộc là tỷ lệ giảm giá [27].

Thứ ba, về nội dung, tác động của tiêu chí, trọng số và phương pháp đánh giá chưa được kiểm định ở Việt Nam: N03 và N04 có nhiều nguồn quốc tế, nhưng nghiên cứu trong nước mới đưa vào như biến quan sát lẻ, ví dụ phương pháp đánh giá theo giá thấp nhất trong [25].

Thứ tư, về lý thuyết, văn liệu thiếu một nền lý thuyết tích hợp: 28 trong 139 nguồn không neo lý thuyết nền, còn các nguồn có lý thuyết thường dùng tách rời cho từng nhóm nhân tố.

Thứ năm, về đo lường, chưa có thước đo hiệu quả ở cấp gói thầu: văn liệu nhân tố ảnh hưởng và văn liệu đo lường kết quả mua sắm công [28] ít trích dẫn lẫn nhau; khung đo lường có sẵn ở cấp tổ chức hoặc quốc gia, còn nghiên cứu trong nước đo hiệu quả quản lý đấu thầu như một khái niệm chung [29] hoặc dùng thành công của dự án [26] hay mức tăng chi phí [25].

Với công trình thủy lợi, các khoảng trống trên cùng tỷ lệ 69,6% gói chỉ một nhà thầu cho thấy mức độ cạnh tranh cần được đo trực tiếp. Nghiên cứu định lượng tiếp theo nên xác định biến phụ thuộc ở cấp gói thầu gồm bốn thành phần không thay thế cho nhau: kinh tế, thời gian, chất lượng lựa chọn và tuân thủ; kiểm định giả thuyết mức độ cạnh tranh là biến trung gian, đo bằng số liệu khách quan từ Hệ thống mạng đấu thầu quốc gia; và chỉ thao tác hóa các nhóm đủ căn cứ, trong đó N18 mới có một nguồn, N10 không biến thiên trong phạm vi mẫu, còn N08 và N11 phù hợp làm biến kiểm soát.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã hệ thống hóa mười tám nhóm nhân tố từ 135 nguồn, trong đó 69 nguồn ở góc độ chủ đầu tư, và đề xuất chuỗi giải thích tích hợp bốn lý thuyết trụ trong đó vai trò trung gian của mức độ cạnh tranh là giả thuyết cần kiểm định.

Nghiên cứu có năm hạn chế: mẫu toàn văn chọn có chủ đích nên bảng tần suất có thể thiên lệch theo phương pháp, tuổi công bố và độ nổi tiếng của nguồn; chỉ 5,3% số bản ghi được chấm đôi và tỷ lệ phân loại sai chưa được ước lượng lại sau khi sửa bộ quy tắc; 41% nguồn toàn văn nằm ngoài phễu sàng lọc chính và 6 bản ghi về công trình nước mới được giữ chưa được đọc toàn văn; thang chất lượng do nghiên cứu sinh xây dựng và một người chấm; dữ liệu quốc tế chỉ từ Scopus, bằng tiếng Anh và tiếng Việt.

Hướng tiếp theo là hợp thức hóa bộ nhân tố và thang đo qua ý kiến chuyên gia, rồi kiểm định mô hình cấu trúc trên dữ liệu khảo sát gói thầu xây lắp công trình thủy lợi, kết hợp số liệu từ Hệ thống mạng đấu thầu quốc gia.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 74/VBHN-VPQH ngày 25/3/2026 Luật Đấu thầu, Hà Nội, 2026.

[2] Chính phủ. Nghị định số 214/2025/NĐ-CP ngày 04/8/2025 quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành Luật Đấu thầu về lựa chọn nhà thầu, Hà Nội, 2025.

[3] Chính phủ. Nghị định số 349/2026/NĐ-CP ngày 09/9/2026 sửa đổi, bổ sung một số điều của các nghị định quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành Luật Đấu thầu về lựa chọn nhà thầu, Hà Nội, 2026.

[4] Tuấn Dũng. Tỷ lệ tiết kiệm trong đấu thầu tăng mạnh. Báo Đấu thầu, 06/7/2026. Internet: https://baodauthau.vn/ty-le-tiet-kiem-trong-dau-thau-tang-manh-post202156.html (truy cập: tháng 8/2026).

[5] Hệ thống mạng đấu thầu quốc gia. Dữ liệu kết quả lựa chọn nhà thầu gói thầu xây lắp, trích xuất ngày 12/10/2026. Internet: https://muasamcong.mof.gov.vn (truy cập: tháng 7/2026).

[6] D. Drew and M. Skitmore. The effect of contract type and size on competitiveness in bidding. Construction Management and Economics, vol. 15, no. 5, pp. 469-489, 1997.

[7] Z. Hatush and M. Skitmore. Criteria for contractor selection. Construction Management and Economics, vol. 15, no. 1, pp. 19-38, 1997.

[8] J. S. Russell and M. J. Skibniewski. Decision criteria in contractor prequalification. Journal of Management in Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 148-164, 1988.

[9] M. J. Page et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, vol. 372, n71, 2021.

[10] M. Aria and C. Cuccurullo. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, vol. 11, no. 4, pp. 959-975, 2017.

[11] M. E. J. Newman and M. Girvan. Finding and evaluating community structure in networks. Physical Review E, vol. 69, no. 2, 026113, 2004.

[12] T. Byrt, J. Bishop and J. B. Carlin. Bias, prevalence and kappa. Journal of Clinical Epidemiology, vol. 46, no. 5, pp. 423-429, 1993.

[13] K. L. Gwet. Computing inter-rater reliability and its variance in the presence of high agreement. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, vol. 61, no. 1, pp. 29-48, 2008.

[14] Q. N. Hong et al. The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) version 2018 for information professionals and researchers. Education for Information, vol. 34, no. 4, pp. 285-291, 2018.

[15] M. Campbell et al. Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: reporting guideline. BMJ, vol. 368, l6890, 2020.

[16] H. H. Noori and S. Rasheed. The effectiveness of applying standard bidding documents in power plant construction projects. Journal of Engineering, University of Baghdad, vol. 29, no. 2, pp. 37-58, 2023.

[17] Q. Wang, R. Zhang and J. Liu. Price/time/intellectual efficiency of procurement: uncovering the related factors in Chinese public authorities. Journal of Purchasing and Supply Management, vol. 26, no. 3, 100622, 2020.

[18] D. C. North, Institutions. Institutional Change and Economic Performance, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[19] P. J. DiMaggio and W. W. Powell. The iron cage revisited: institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. American Sociological Review, vol. 48, no. 2, pp. 147-160, 1983.

[20] J. Barney. Firm resources and sustained competitive advantage. Journal of Management, vol. 17, no. 1, pp. 99-120, 1991.

[21] G. A. Akerlof. The market for 'lemons': quality uncertainty and the market mechanism. The Quarterly Journal of Economics, vol. 84, no. 3, pp. 488-500, 1970.

[22] P. R. Milgrom and R. J. Weber. A theory of auctions and competitive bidding. Econometrica, vol. 50, no. 5, pp. 1089-1122, 1982.

[23] R. H. Thaler. Anomalies: the winner's curse. Journal of Economic Perspectives, vol. 2, no. 1, pp. 191-202, 1988.

[24] Lê Minh Khoa và Nguyễn Thanh Tâm. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến công tác lựa chọn nhà thầu thi công xây dựng công trình thủy lợi tỉnh Bến Tre. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, tập 13, số 06, tr. 63-67, 2023.

[25] Trần Thị Hồng Phúc. Nghiên cứu các nhân tố tác động đến chi phí đầu tư xây dựng hệ thống công trình đầu mối thủy lợi ở Việt Nam. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội, 2022.

[26] Nguyễn Thị Thu Hằng. Nghiên cứu các nhân tố ảnh hưởng đến thành công của dự án đầu tư xây dựng. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2024.

[27] Nguyễn Phước Hoàng. Hiệu quả trong đầu tư công thông qua công tác đấu thầu trên địa bàn tỉnh Bạc Liêu. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, Phần D, số 46, tr. 60-67, 2016, doi: 10.22144/ctu.jvn.2016.570.

[28] A. S. Patrucco, D. Luzzini and S. Ronchi. Evaluating the effectiveness of public procurement performance management systems in local governments. Local Government Studies, vol. 42, no. 5, pp. 739-761, 2016.

[29] Hồ Đức Tỵ, Nguyễn Văn Tiếp, Nguyễn Bá Quang Vinh và Trần Quang Phú. Xác định yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả quản lý đấu thầu tại các ban quản lý dự án đầu tư xây dựng cấp quận, huyện ở khu vực đồng bằng sông Cửu Long, Việt Nam. Tạp chí Giao thông vận tải, số 09, tr. 165-167, 2023.

■ Ngày nộp bài: 02/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/10/2026

Nghiên cứu đề xuất giải pháp thích ứng cho ngành vận tải, logistics Việt Nam trong bối cảnh biến động môi trường quốc tế hiện nay

Research on adaptation solutions for vietnam's transportation and logistics industry in the context of current international environmental changes

> TS MAI BÁ LĨNH
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
Email: linhmb@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, xung đột địa chính trị, tranh chấp thương mại, gia tăng thuế quan và xu hướng bảo hộ làm thay đổi dòng thương mại, tuyến vận tải, chuỗi cung ứng và chi phí logistics toàn cầu. Đối với Việt Nam, các biến động này tác động đến nhu cầu vận tải, sản lượng hàng hóa, cước phí, thời gian giao hàng, xuất nhập khẩu và năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp logistics. Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích, tổng hợp, so sánh và phân tích xu hướng để nhận diện tác động và đề xuất giải pháp thích ứng. Kết quả cho thấy các tác động chủ yếu gồm: Thay đổi thị trường và dòng thương mại; tuyến và phương thức vận tải; cước phí và chi phí logistics; yêu cầu về xuất xứ, truy xuất nguồn gốc; nguy cơ gián đoạn chuỗi cung ứng, đồng thời mở ra cơ hội từ dịch chuyển và tái cấu trúc chuỗi cung ứng.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất: Đa dạng hóa thị trường, đối tác, tuyến và phương thức vận tải; nâng cao năng lực dự báo rủi ro; tăng cường tuân thủ thương mại; xây dựng chuỗi cung ứng linh hoạt; kiểm soát chi phí; đẩy mạnh chuyển đổi số; nâng cao chất lượng nhân lực và tăng cường liên kết trong chuỗi logistics.

Từ khóa: Xung đột; địa chính trị; tranh chấp; bảo hộ.

ABSTRACT

In recent years, geopolitical conflicts, trade disputes, rising tariffs and protectionist trends have altered global trade flows, transportation routes, supply chains and logistics costs. For Vietnam, these developments have affected transportation demand, cargo volumes, freight rates, delivery times, import and export activities and the competitiveness of logistics enterprises. This study uses analytical, synthesis, comparative and trend analysis methods to identify these impacts and propose adaptation solutions. The findings indicate that the main impacts include changes in markets and trade flows; transportation routes and modes; freight rates and logistics costs; requirements for origin and traceability and risks of supply chain disruptions. At the same time, these changes create opportunities arising from supply chain shifts and restructuring.

Based on these findings, the study proposes solutions including diversifying markets, partners, transportation routes and modes; strengthening risk forecasting capabilities; enhancing trade compliance; building flexible supply chains; controlling costs; promoting digital transformation; improving workforce quality and strengthening cooperation among stakeholders across the logistics chain.

Keywords: Conflicts; geopolitical; disputes; protectionism.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và hội nhập kinh tế quốc tế, ngành vận tải và logistics ngày càng phụ thuộc vào sự ổn định của thương mại và chuỗi cung ứng toàn cầu. Tuy nhiên, môi trường quốc tế ngày càng phức tạp, khó dự báo do xung đột địa chính trị, cạnh tranh giữa các nền kinh tế lớn, tranh chấp thương mại, thay đổi thuế quan và xu hướng bảo hộ [1, 2, 3, 4].

Xung đột Nga - Ukraine đã gây gián đoạn thương mại và logistics tại Ukraine và khu vực Biển Đen, thúc đẩy tìm kiếm các tuyến vận tải thay thế, gia tăng nhu cầu hạ tầng, dịch vụ vận tải đường bộ, đường biển và làm tăng chi phí vận chuyển. Bên cạnh đó, căng thẳng thương mại Hoa Kỳ - Trung Quốc cùng các chính sách thuế quan mới đang làm thay đổi dòng thương mại quốc tế [1, 2, 3, 4].

Xu hướng bảo hộ còn thể hiện qua phòng vệ thương mại, yêu cầu về xuất xứ, truy xuất nguồn gốc, tiêu chuẩn kỹ thuật, môi trường và kiểm soát chuỗi cung ứng, làm gia tăng yêu cầu đối với doanh nghiệp xuất nhập khẩu và logistics về quản lý hàng hóa, chứng từ và nguồn gốc sản phẩm [1, 2, 3, 4].

Đối với Việt Nam, các biến động này vừa tạo thách thức về chi phí, tuyến vận tải, kiểm soát thương mại và nguy cơ gián đoạn chuỗi cung ứng, vừa mở ra cơ hội từ dịch chuyển sản xuất, tái cấu trúc chuỗi cung ứng và chuyển hướng thương mại, qua đó gia tăng nhu cầu về vận tải, kho bãi, giao nhận và dịch vụ logistics. Vì vậy, nghiên cứu tác động của xung đột địa chính trị, tranh chấp thương mại và xu hướng bảo hộ đối với ngành vận tải và logistics Việt Nam, từ đó đề xuất giải pháp thích ứng, là cần thiết.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích - tổng hợp tài liệu để nhận diện các biến động địa chính trị và thương mại quốc tế như xung đột, căng thẳng thương mại, thuế quan và bảo hộ.

Phương pháp so sánh được sử dụng để đánh giá sự thay đổi của dòng thương mại, tuyến vận tải, chi phí logistics và yêu cầu đối với doanh nghiệp.

Phân tích xu hướng nhằm nhận diện sự dịch chuyển thương mại, tái cấu trúc chuỗi cung ứng, thay đổi phương thức vận tải và gia tăng yêu cầu về kiểm soát xuất xứ, minh bạch chuỗi cung ứng.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định các tác động chủ yếu đến ngành vận tải, logistics Việt Nam và đề xuất giải pháp thích ứng, linh hoạt, giảm phụ thuộc.

3. THỰC TRẠNG XUNG ĐỘT ĐỊA CHÍNH TRỊ, TRANH CHẤP THƯƠNG MẠI VÀ XU HƯỚNG BẢO HỘ TRÊN THẾ GIỚI

3.1. Xung đột Nga - Ukraine và sự thay đổi dòng vận tải

Xung đột Nga - Ukraine đã làm thay đổi đáng kể hoạt động thương mại và vận tải tại khu vực Biển Đen. Việc hạn chế hoặc gián đoạn một số tuyến thương mại buộc hàng hóa phải tìm kiếm các tuyến thay thế, làm tăng khoảng cách vận chuyển và nhu cầu đối với các phương thức vận tải khác. Xung đột đã làm tăng nhu cầu đối với các tuyến vận tải thay thế và gây sức ép lên chi phí vận tải. Giá vận chuyển hàng rời tăng mạnh trong giai đoạn đầu xung đột, đồng thời các hạn chế đối với nguồn cung dầu, khí và phân bón từ khu vực liên quan làm gia tăng chi phí năng lượng và nhiên liệu hàng hải [5].

3.2. Căng thẳng thương mại giữa Hoa Kỳ và Trung Quốc

Hoa Kỳ và Trung Quốc là hai nền kinh tế có vai trò đặc biệt quan trọng đối với thương mại toàn cầu. Việc gia tăng thuế quan và các biện pháp hạn chế thương mại giữa hai nước có thể làm thay đổi dòng hàng hóa và chuỗi cung ứng. Căng thẳng thương mại Mỹ - Trung có thể tạo ra sự chuyển hướng thương mại, khi hàng hóa của một bên tìm kiếm các thị trường khác để thay thế thị trường bị hạn chế. Đồng thời, sự thay đổi trong quan hệ thương mại giữa hai nền kinh tế lớn có thể ảnh hưởng đến các nền kinh tế thứ ba thông qua thay đổi nhu cầu, cạnh tranh và chuỗi cung ứng [5].

3.3. Gia tăng thuế quan và các biện pháp thương mại

Những thay đổi về thuế quan tại các thị trường lớn làm gia tăng mức độ bất định đối với doanh nghiệp xuất nhập khẩu. Thuế quan có thể làm thay đổi giá hàng hóa, khả năng cạnh tranh và quyết định lựa chọn thị trường của doanh nghiệp. Đối với logistics, sự thay đổi thuế quan có thể dẫn đến: Thay đổi sản lượng hàng hóa xuất nhập khẩu; thay đổi thị trường xuất nhập khẩu; thay đổi tuyến vận tải; thay đổi nhu cầu kho bãi; tăng yêu cầu xử lý chứng từ; tăng thời gian và chi phí thông quan; gia tăng nhu cầu tư vấn và quản lý thương mại.

3.4. Xu hướng bảo hộ thương mại

Bảo hộ thương mại ngày càng được thể hiện dưới nhiều hình thức khác nhau. Bên cạnh thuế quan, các quốc gia có thể sử dụng các biện pháp phòng vệ thương mại, yêu cầu xuất xứ, tiêu chuẩn kỹ thuật, quy định môi trường và các yêu cầu về minh bạch chuỗi cung ứng...

3.5. Xu hướng phân mảnh và tái cấu trúc chuỗi cung ứng

Những biến động địa chính trị và thương mại đang thúc đẩy doanh nghiệp quốc tế xem xét lại sự phụ thuộc vào một số thị trường hoặc nhà cung cấp. Xu hướng đa dạng hóa nguồn cung, nearshoring (dịch chuyển chuỗi cung ứng sang các quốc gia lân cận), friendshoring (dịch chuyển chuỗi cung ứng sang các quốc gia đối tác tin cậy) và dịch chuyển sản xuất có thể làm thay đổi cấu trúc chuỗi cung ứng toàn cầu. Căng thẳng chính trị, thay đổi mô hình thương mại và việc tái cấu trúc tuyến hàng hải đang làm thay đổi địa lý của thương mại biển; các tuyến vận tải dài hơn làm tăng khoảng cách vận chuyển và chi phí.

4. TÁC ĐỘNG CỦA XUNG ĐỘT ĐỊA CHÍNH TRỊ, TRANH CHẤP THƯƠNG MẠI VÀ BẢO HỘ ĐẾN NGÀNH VẬN TẢI, LOGISTICS VIỆT NAM

4.1. Tác động đến nhu cầu và sản lượng vận tải

Biến động thương mại quốc tế có tác động trực tiếp đến nhu cầu vận tải. Khi dòng thương mại giữa các quốc gia thay đổi, sản lượng hàng hóa trên các tuyến vận tải cũng thay đổi theo. Việc chuyển hướng thương mại có thể làm giảm nhu cầu trên một số tuyến nhưng đồng thời làm tăng nhu cầu trên các tuyến và thị trường khác. Sự dịch chuyển chuỗi cung ứng có thể làm tăng nhu cầu vận tải phục vụ xuất nhập khẩu, vận chuyển nguyên liệu, hàng thành phẩm, kho bãi và giao nhận. Mức độ tác động: 5/5 - Rất cao [5].

4.2. Tác động đến tuyến vận tải và thời gian giao hàng

Xung đột địa chính trị có thể làm cho một số tuyến vận tải trở nên rủi ro hoặc không còn phù hợp. Doanh nghiệp phải chuyển sang tuyến thay thế, dẫn đến tăng quãng đường và thời gian vận chuyển. Trong năm 2024 - 2025, quãng đường vận chuyển tính theo ton-miles tăng gần 6%, nhanh hơn đáng kể so với tăng trưởng khối lượng thương mại. Thời gian giao hàng kéo dài có thể làm tăng chi phí tồn kho, chi phí vốn và nguy cơ chậm giao hàng. Mức độ tác động: 5/5 - Rất cao [5].

4.3. Tác động đến cước vận tải và chi phí logistics

Thay đổi tuyến vận tải, giá nhiên liệu, phí bảo hiểm và mất cân đối cung - cầu có thể làm cước vận tải biến động mạnh. Biến động cước vận tải đã trở thành một đặc điểm đáng chú ý trong môi trường vận tải quốc tế, trong đó căng thẳng địa chính trị và thay đổi chính sách thương mại là những yếu tố góp phần làm gia tăng biến động. Chi phí vận tải tăng có thể làm giảm biên lợi nhuận hoặc buộc doanh nghiệp phải điều chỉnh giá dịch vụ. Mức độ tác động: 5/5 - Rất cao [5].

4.4. Tác động đến hoạt động xuất nhập khẩu

Tranh chấp thương mại và bảo hộ có thể làm thay đổi khả năng tiếp cận thị trường của hàng hóa Việt Nam. Khi một thị trường tăng thuế hoặc áp dụng biện pháp phòng vệ thương mại, doanh nghiệp có thể phải tìm kiếm thị trường mới hoặc thay đổi cơ cấu sản phẩm. Điều này kéo theo sự thay đổi về: Sản lượng xuất nhập khẩu; thị trường; tuyến vận chuyển; cảng xuất nhập khẩu; phương thức vận tải; nhu cầu kho bãi; dịch vụ logistics. mức độ tác động: 5/5 - Rất cao [5].

4.5. Tác động đến yêu cầu về xuất xứ và truy xuất nguồn gốc

Đây là một tác động ngày càng quan trọng. Khi các quốc gia tăng cường kiểm soát nguồn gốc hàng hóa, doanh nghiệp phải chứng minh rõ hàng hóa được sản xuất ở đâu, nguyên liệu đến từ đâu và quá trình sản xuất, lưu chuyển như thế nào. Do đó, doanh nghiệp logistics cần nâng cao năng lực quản lý dữ liệu và chứng từ, thay vì chỉ tập trung vào hoạt động vận chuyển. Mức độ tác động: 4/5 - Cao [5].

4.6. Tác động đến chuỗi cung ứng

Xung đột và tranh chấp thương mại làm gia tăng rủi ro phụ thuộc vào một thị trường, một nhà cung cấp hoặc một tuyến vận tải. Doanh nghiệp có xu hướng tìm kiếm nhà cung cấp thay thế, tăng mức dự phòng và phân tán hoạt động logistics. Điều này làm gia tăng nhu cầu đối với: Kho dự phòng; nhà cung cấp logistics thứ hai; tuyến vận tải thay thế; đa dạng hóa phương thức vận tải; hệ thống theo dõi hàng hóa; dữ liệu chuỗi cung ứng. mức độ tác động: 5/5 - Rất cao [5].

4.7. Tác động đến hoạt động logistics tại Việt Nam: Cơ hội và thách thức

Bên cạnh các tác động bất lợi, sự tái cấu trúc thương mại quốc tế cũng tạo ra cơ hội cho ngành Logistics Việt Nam. Cơ hội có thể xuất hiện từ: Dịch chuyển sản xuất; gia tăng xuất nhập khẩu; mở rộng thị trường; gia tăng nhu cầu kho bãi; tăng nhu cầu vận tải nội địa; phát triển logistics xuyên biên giới; tăng nhu cầu dịch vụ logistics tích hợp. Tuy nhiên, cơ hội này đi kèm với yêu cầu cao hơn về năng lực quản trị, chất lượng dịch vụ, nguồn nhân lực, công nghệ, truy xuất nguồn gốc và tuân thủ thương mại [5].

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của xung đột địa chính trị, tranh chấp thương mại và xu hướng bảo hộ thương mại đối với ngành vận tải, logistics Việt Nam, nghiên cứu tiến hành xem xét 7 nhóm yếu tố tác động chủ yếu, bao gồm nhu cầu và sản lượng vận tải, tuyến vận tải, chi phí logistics, hoạt động xuất nhập khẩu, yêu cầu về xuất xứ hàng hóa, chuỗi cung ứng và cơ hội, thách thức đối với ngành logistics Việt Nam. Trên cơ sở đó, mỗi yếu tố được xác định trọng số theo mức độ quan trọng tương đối và chấm điểm tác động theo thang điểm từ 1 đến 5. Điểm tác động có trọng số được tính bằng tích giữa trọng số và điểm đánh giá của từng yếu tố. Kết quả tổng hợp được trình bày tại Bảng 1 và Bảng 2 dưới đây, làm cơ sở xác định những vấn đề cần ưu tiên trong công tác quản trị và hoạch định chiến lược của các doanh nghiệp vận tải, logistics Việt Nam.

Bảng 1. Cơ sở xác định trọng số

Yếu tố	Cơ sở xác định trọng số
Nhu cầu và sản lượng vận tải	Ảnh hưởng trực tiếp đến quy mô thị trường và nhu cầu sử dụng dịch vụ vận tải, logistics.
Tuyến vận tải và thời gian giao hàng	Ảnh hưởng đến khả năng kết nối, thời gian vận chuyển và mức độ ổn định của hoạt động giao nhận.
Cước vận tải và chi phí logistics	Tác động trực tiếp đến giá thành dịch vụ, biên lợi nhuận và năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp.
Hoạt động xuất nhập khẩu	Ảnh hưởng đến nguồn hàng, thị trường, sản lượng hàng hóa và nhu cầu dịch vụ logistics.
Xuất xứ và truy xuất nguồn gốc	Làm gia tăng yêu cầu về chứng từ, dữ liệu, công nghệ và năng lực tuân thủ thương mại.
Chuỗi cung ứng	Tác động đến nguồn cung, nhà cung cấp, hệ thống kho bãi và khả năng duy trì hoạt động liên tục.
Cơ hội và thách thức đối với logistics Việt Nam	Phản ánh tác động tổng hợp đến khả năng mở rộng thị trường, thu hút hàng hóa và nâng cao năng lực cạnh tranh.

Bảng 2. Bảng đánh giá mức độ tác động có trọng số

STT	Yếu tố tác động	Trọng số	Điểm tác động (1-5)	Điểm có trọng số
1	Tác động đến nhu cầu và sản lượng vận tải	0,15	5	0,75
2	Tác động đến tuyến vận tải và thời gian giao hàng	0,15	5	0,75
3	Tác động đến cước vận tải và chi phí logistics	0,18	5	0,90
4	Tác động đến hoạt động xuất nhập khẩu	0,15	5	0,75
5	Tác động đến yêu cầu về xuất xứ và truy xuất nguồn gốc	0,10	4	0,40
6	Tác động đến chuỗi cung ứng	0,15	5	0,75
7	Tác động đến hoạt động logistics tại Việt Nam: Cơ hội và thách thức	0,12	5	0,60
	Tổng cộng	1,00		4,90

Kết quả đánh giá 7 yếu tố thuộc nhóm xung đột địa chính trị, tranh chấp thương mại và xu hướng bảo hộ thương mại cho thấy nhóm yếu tố này có mức độ tác động rất cao đến ngành vận tải, logistics Việt Nam, với tổng điểm tác động có trọng số đạt 4,90/5,00. Trong đó, yếu tố tác động nổi bật nhất là cước vận tải và chi phí logistics, với trọng số 0,18, điểm đánh giá 5/5 và điểm có trọng số 0,90. Đây là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến giá thành dịch vụ, biên lợi nhuận và năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp. Các yếu tố về nhu cầu và sản lượng vận tải, tuyến vận tải và thời gian giao hàng, hoạt động xuất nhập khẩu và chuỗi cung ứng đều đạt mức tác động 5/5, phản ánh sự phụ thuộc chặt chẽ giữa hoạt động vận tải, logistics Việt Nam với những biến động của thương mại và chuỗi cung ứng quốc tế. Bên cạnh đó, yêu cầu về xuất xứ và truy xuất nguồn gốc đạt mức tác động 4/5, cho thấy áp lực ngày càng tăng đối với doanh nghiệp trong quản lý chứng từ, dữ liệu và tuân thủ các quy định thương mại quốc tế. Đáng chú ý, quá trình tái cấu trúc thương mại và dịch chuyển chuỗi cung ứng không chỉ tạo ra những thách thức về chi phí, rủi ro vận tải và khả năng đáp ứng đơn hàng, mà còn mở ra cơ hội thu hút dòng hàng hóa, mở rộng thị trường, phát triển dịch vụ kho bãi, vận tải nội địa và logistics tích hợp tại Việt Nam. Vì vậy, các doanh nghiệp vận tải, logistics cần chủ động theo dõi diễn biến địa chính trị và chính sách thương mại quốc tế, đa dạng hóa thị trường và tuyến vận tải, nâng cao năng lực dự báo, quản trị rủi ro, kiểm soát chi phí và đẩy mạnh ứng dụng công nghệ trong quản lý chuỗi cung ứng nhằm tận dụng cơ hội, hạn chế tác động bất lợi và nâng cao năng lực cạnh tranh trong bối cảnh môi trường quốc tế biến động.

5. NHỮNG VẤN ĐỀ CẦN GIẢI QUYẾT

Từ những tác động trên, ngành vận tải và logistics Việt Nam cần tập trung giải quyết một số vấn đề:

Thứ nhất, nâng cao năng lực dự báo rủi ro địa chính trị, thương mại, chính sách, thuế quan, tuyến vận tải và thị trường.

Thứ hai, giảm phụ thuộc vào một số thị trường, đối tác và tuyến vận tải, tăng khả năng chuyển đổi khi có biến động.

Thứ ba, nâng cao khả năng kiểm soát chi phí trước biến động cước vận tải, nhiên liệu và tỷ giá.

Thứ tư, tăng cường năng lực đáp ứng yêu cầu về xuất xứ, truy xuất nguồn gốc và tuân thủ thương mại.

Thứ năm, đẩy mạnh chuyển đổi số và chia sẻ dữ liệu giữa các chủ thể trong chuỗi cung ứng.

Thứ sáu, phát triển nguồn nhân lực có kiến thức tổng hợp về logistics, thương mại quốc tế, quản trị rủi ro và công nghệ.

Thứ bảy, tăng cường liên kết giữa doanh nghiệp vận tải, logistics, xuất nhập khẩu, cảng, kho bãi và các chủ thể trong chuỗi cung ứng.

6. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP THÍCH ỨNG CHO NGÀNH VẬN TẢI, LOGISTIC VIỆT NAM

6.1. Đa dạng hóa thị trường và đối tác

Doanh nghiệp cần hạn chế sự phụ thuộc quá lớn vào một số thị trường xuất nhập khẩu. Bên cạnh các thị trường truyền thống, cần chủ động khai thác thêm các thị trường ASEAN, Ấn Độ, Trung Đông và các khu vực có tiềm năng. Đồng thời, cần xây dựng mạng lưới đối tác logistics rộng hơn nhằm có khả năng thay thế khi một thị trường hoặc đối tác gặp biến động.

6.2. Đa dạng hóa tuyến và phương thức vận tải

Doanh nghiệp cần xây dựng các tuyến vận tải thay thế cho những tuyến có nguy cơ chịu ảnh hưởng bởi xung đột. Đồng thời, cần tăng khả năng kết hợp: Đường biển → Đường sắt → Đường bộ → Đường hàng không tùy theo yêu cầu về chi phí, thời gian và đặc điểm hàng hóa. Mục tiêu là duy trì dòng hàng ngay cả khi một tuyến hoặc phương thức vận tải bị gián đoạn.

6.3. Xây dựng hệ thống cảnh báo rủi ro địa chính trị và thương mại

Cần dựng hệ thống cảnh báo rủi ro địa chính trị và thương mại, trước mắt cần thường xuyên theo dõi, cập nhật các dữ liệu về: Xung đột quốc tế; chính sách thuế quan; các biện pháp phòng vệ thương mại; thay đổi chính sách nhập khẩu; thay đổi tuyến vận tải; giá nhiên liệu; cước vận tải; các quy định về xuất xứ; các yêu cầu về môi trường và truy xuất nguồn gốc. Trên cơ sở quy trình sau: Theo dõi → Thu thập dữ liệu → Phân tích → Cảnh báo → Đánh giá tác động → Xây dựng kịch bản → Lựa chọn phương án → Thực hiện → Đánh giá.

6.4. Nâng cao năng lực quản trị xuất xứ và tuân thủ thương mại

Doanh nghiệp logistics cần phối hợp chặt chẽ với doanh nghiệp xuất nhập khẩu trong việc quản lý: Chứng nhận xuất xứ; hồ sơ hàng hóa; nguồn nguyên liệu; nhà cung cấp; lịch sử giao dịch; chứng từ vận tải; dữ liệu truy xuất nguồn gốc. Cần xây dựng hệ thống dữ liệu minh bạch để có thể chứng minh nguồn gốc hàng hóa khi thị trường nhập khẩu yêu cầu.

6.5. Xây dựng chuỗi cung ứng linh hoạt

Doanh nghiệp cần chuyển từ mô hình chuỗi cung ứng phụ thuộc vào một nguồn sang mô hình có khả năng thay thế. Có thể thực hiện bằng cách: Có nhiều nhà cung cấp; có nhiều hãng vận tải; có nhiều tuyến vận chuyển; có kho dự phòng; có phương thức vận tải thay thế; có kế hoạch ứng phó khẩn cấp. Mục tiêu không phải là loại bỏ hoàn toàn rủi ro mà là giảm mức độ phụ thuộc và rút ngắn thời gian phục hồi khi xảy ra gián đoạn.

6.6. Nâng cao khả năng kiểm soát chi phí

Doanh nghiệp cần kiểm soát chi phí theo từng khâu của chuỗi logistics. Cần thực hiện ngay một số nội dung sau: Tối ưu hóa tuyến vận chuyển; tối ưu tải trọng; giảm xe chạy rỗng; kiểm soát nhiên liệu; giảm thời gian chờ; tối ưu hoạt động kho; đàm phán hợp đồng dài hạn; chủ động điều chỉnh phụ phí khi chi phí đầu vào biến động. Đồng thời, cần sử dụng dữ liệu để theo dõi biến động chi phí và xây dựng các kịch bản giá dịch vụ.

6.7. Đẩy mạnh chuyển đổi số

Chuyển đổi số cần trở thành công cụ hỗ trợ quản trị rủi ro và thích ứng. Doanh nghiệp có thể sử dụng: AI: Ddự báo nhu cầu và biến động; Big Data: Phân tích dòng hàng; IoT: Theo dõi hàng hóa và phương tiện; GPS: Theo dõi tuyến vận tải; TMS: Tối ưu vận tải; WMS: Quản lý kho; RFID/QR: Truy xuất hàng hóa. Mục tiêu là hình thành hệ thống thông tin giúp doanh nghiệp có thể nhanh chóng trả lời các câu hỏi: Hàng đang ở đâu? → Khi nào đến? → Chi phí bao nhiêu? → Rủi ro ở đâu? → Có tuyến thay thế nào? → Phương án nào phù hợp nhất?

6.8. Nâng cao chất lượng nguồn nhân lực

Doanh nghiệp cần phát triển đội ngũ nhân lực có kiến thức tổng hợp về: Logistics; vận tải quốc tế; thương mại quốc tế; chính sách thương mại; phòng vệ thương mại; quản trị rủi ro; công nghệ số; ngoại ngữ. Đặc biệt, nhân sự logistics cần có khả năng phân tích thông tin và đưa ra phương án khi thị trường hoặc chính sách thay đổi.

6.9. Tăng cường liên kết giữa các chủ thể trong chuỗi logistics

Doanh nghiệp vận tải và logistics cần tăng cường hợp tác với: Doanh nghiệp xuất nhập khẩu; hãng tàu; hãng hàng không; cảng biển; đường sắt; doanh nghiệp đường bộ; kho bãi; hải quan; đại lý logistics; đối tác quốc tế. Việc chia sẻ thông tin và phối hợp kế hoạch giúp các chủ thể phản ứng nhanh hơn trước những biến động quốc tế.

7. THẢO LUẬN

Hai nhóm tác động (xung đột địa chính trị và tranh chấp thương mại và bảo hộ) có thể đồng thời xảy ra và tạo ra hiệu ứng cộng hưởng. Do đó, doanh nghiệp không thể chỉ sử dụng một giải pháp riêng lẻ mà cần xây dựng năng lực thích ứng tổng thể. Một điểm đáng chú ý là biến động quốc tế cũng tạo ra cơ hội. Khi các doanh nghiệp toàn cầu tái cấu trúc chuỗi cung ứng, Việt Nam có khả năng thu hút thêm hoạt động sản xuất, thương mại và logistics. Tuy nhiên, để khai thác cơ hội này, doanh nghiệp Việt Nam cần nâng cao chất lượng dịch vụ, năng lực quản trị, công nghệ, khả năng truy xuất nguồn gốc và mức độ tuân thủ các yêu cầu quốc tế.

8. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã đề xuất các nhóm giải pháp chủ yếu gồm: Đa dạng hóa thị trường và đối tác; đa dạng hóa tuyến và phương thức vận tải; xây dựng hệ thống cảnh báo rủi ro địa chính trị - thương mại; nâng cao năng lực quản trị xuất xứ và tuân thủ thương mại; xây dựng chuỗi cung ứng linh hoạt; kiểm soát chi phí; đẩy mạnh chuyển đổi số; nâng cao chất lượng nguồn nhân lực; và tăng cường liên kết giữa các chủ thể trong chuỗi logistics.

Trong bối cảnh môi trường quốc tế tiếp tục biến động, năng lực thích ứng cần trở thành một bộ phận quan trọng của quản trị logistics. Doanh nghiệp cần chuyển từ tư duy "Ứng phó khi biến động xảy ra" sang "Dự báo - Phòng ngừa - Thích ứng - Phục hồi - Cải tiến". Đây là cơ sở để ngành vận tải, logistics Việt Nam duy trì hoạt động ổn định, tận dụng cơ hội từ sự dịch chuyển thương mại và nâng cao năng lực cạnh tranh trong quá trình hội nhập quốc tế.

Tài liệu tham khảo

[1] Bộ Công Thương. Báo cáo Logistics Việt Nam 2025, 2025.

[2] Bộ Công Thương. Báo cáo Xuất nhập khẩu Việt Nam 2025, 2025.

[3] Bộ Công Thương. Giải pháp logistics để đẩy mạnh xuất khẩu vào thị trường Hoa Kỳ trong bối cảnh mới, 2025.

[4] Bộ Công Thương. Tăng cường truy xuất nguồn gốc, minh bạch chuỗi cung ứng trước yêu cầu mới của thị trường Hoa Kỳ, 2026.

[5] Mai Bá Lĩnh. Phân tích biến động môi trường quốc tế và tác động đến ngành vận tải, logistics Việt Nam nhằm nâng cao hiệu quả quản trị logistics trong bối cảnh hiện nay. Tạp chí Xây dựng số 10, tr. 210-214, 2026.

■ Ngày nộp bài: 05/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/11/2026

Nghiên cứu các yếu tố rủi ro liên quan đến đơn vị tư vấn trong các dự án đầu tư xây dựng công trình giao thông sử dụng vốn đầu tư công tại Việt Nam

A study of risk factors associated with consulting firms in transport infrastructure construction projects using public investment funds in Vietnam

> THS.NCS TRẦN MINH ĐỨC, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI*
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: hainl@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nhận diện các yếu tố rủi ro liên quan đến đơn vị tư vấn (nhóm S) trong các dự án xây dựng công trình giao thông (CTGT) sử dụng vốn đầu tư công (ĐTC) tại Việt Nam. Nghiên cứu kết hợp tổng hợp tài liệu, phân tích nội dung Luật Xây dựng năm 2025 và các nghị định hướng dẫn với đối chiếu đặc điểm kỹ thuật, tổ chức của dự án CTGT. Kết quả cho thấy rủi ro nhóm S có hai đặc trưng: Độ trễ giữa thời điểm phát sinh sai lệch chuyên môn và thời điểm rủi ro xuất hiện; vai trò kép của đơn vị tư vấn vừa tạo lập giải pháp, vừa giám sát và kiểm soát chất lượng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác lập ranh giới giữa nhóm S với chủ đầu tư và nhà thầu, xây dựng 3 cụm chức năng của hoạt động tư vấn và nhận diện 6 yếu tố rủi ro S1-S6, mỗi yếu tố kèm căn cứ đối chiếu và trạng thái bất lợi. Danh mục S1-S6 là đầu vào cho các bước chuẩn hóa, sàng lọc và phân tích định lượng tiếp theo.

Từ khóa: Rủi ro dự án; đơn vị tư vấn; khảo sát, thiết kế; tư vấn giám sát; dự án sử dụng vốn đầu tư công; quản lý rủi ro theo chủ thể.

ABSTRACT

This study identifies risk factors associated with consulting firms (Group S) in transport infrastructure construction projects financed by public investment funds in Vietnam. It combines a literature synthesis and content analysis of the 2025 Law on Construction and its implementing decrees with an examination of the technical and organizational characteristics of transport projects. Group S risks are characterized by a time lag between the occurrence of professional errors and the manifestation of the associated risks and by the dual role of consulting firms in developing technical solutions and performing supervision and quality control. On this basis, the study delineates the boundaries between Group S, project owners and contractors, establishes three functional clusters of consulting activities and identifies six risk factors, coded S1-S6, each with supporting references and a corresponding adverse condition. The S1-S6 list provides input for subsequent standardization, screening and quantitative analysis.

Keywords: Project risk; consulting firm; survey and design; construction supervision; public investment-funded projects; stakeholder-based risk management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các dự án xây dựng CTGT sử dụng vốn ĐTC tại Việt Nam có quy mô đầu tư lớn, thời gian thực hiện dài, điều kiện địa chất và hiện trạng hạ tầng dọc tuyến phức tạp. Đơn vị tư vấn tham gia từ khảo sát, lập dự án, thiết kế, thẩm tra đến giám sát thi công, qua đó tạo lập cơ sở kỹ thuật cho các quyết định về đầu tư, chi phí, lựa chọn nhà thầu, tổ chức thi công và nghiệm thu. Vì vậy, sai lệch chuyên môn hình thành ở giai đoạn chuẩn bị thường bộc lộ khi thi công, thông qua điều chỉnh thiết kế, phát sinh khối lượng, gián đoạn thi công hoặc tranh chấp hợp đồng. Các nghiên cứu về dự án hạ tầng giao thông đã nhận diện các rủi ro liên quan đến chất lượng thiết kế, thay đổi thiết kế, độ chính xác của dự toán, công trình hạ tầng ngầm và điều kiện hiện trường [1-4].

Các nghiên cứu về rủi ro dự án xây dựng và dự án giao thông thường phân nhóm rủi ro theo bản chất kỹ thuật, tài chính, pháp lý, tiến độ hoặc môi trường [2, 4, 5], sau đó phân bổ rủi ro cho các bên

theo hợp đồng, trong đó các vấn đề về hồ sơ thiết kế được giao cho chủ đầu tư [5]. Theo hướng tiếp cận bên liên quan, Xia và cộng sự [6] phân tích việc quản lý thuộc tính của các bên liên quan nhằm giảm thiểu rủi ro từ phía nhà thầu; Vo và Yang [7] tích hợp nhận thức của các bên liên quan vào đánh giá rủi ro dự án đường cao tốc. Tại Việt Nam, các nghiên cứu đã xem xét ảnh hưởng của lập kế hoạch, tổ chức và quản lý đến hiệu quả dự án hạ tầng giao thông sử dụng vốn ĐTC [8, 9]. Bài báo bổ sung hướng tiếp cận theo chức năng chủ thể: nhận diện các yếu tố rủi ro liên quan đến đơn vị tư vấn (nhóm S) và xác lập ranh giới giữa nhóm S với chủ đầu tư và nhà thầu, bảo đảm tính nhất quán trong phân loại rủi ro theo chủ thể.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NHẬN DIỆN RỦI RO

Danh mục yếu tố rủi ro sơ bộ được hình thành từ 3 nguồn: Kết quả tổng quan nghiên cứu; chức năng, quyền và nghĩa vụ của các chủ thể theo văn bản pháp lý; đặc điểm kỹ thuật, tổ chức của dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC. Phương pháp gồm tổng hợp tài liệu, phân tích nội dung văn bản pháp lý và đối chiếu pháp lý - chức năng để phân định ranh giới giữa các nhóm chủ thể.

Cơ sở lý luận gồm 4 nhóm tài liệu. ISO 31000:2018 [10] và PMBOK ấn bản thứ sáu [11] là căn cứ xác định yếu tố có khả năng ảnh hưởng đến mục tiêu dự án; ấn bản thứ sáu được lựa chọn vì định nghĩa rủi ro dự án theo hướng sự kiện hoặc điều kiện không chắc chắn và cụ thể hóa các tiến trình quản lý rủi ro ở cấp dự án. Lý thuyết các bên liên quan [12], mô hình mức độ nổi bật của Mitchell và cộng sự [13] và lý thuyết thể chế [14, 15] hỗ trợ xác định chủ thể gắn với yếu tố và ảnh hưởng của luật lệ, phân cấp thẩm quyền, chuẩn mực nghề nghiệp đối với hành vi của chủ thể. Lý thuyết đại diện [16, 17] được dùng để diễn giải quan hệ ủy quyền giữa chủ đầu tư và đơn vị tư vấn. Các nghiên cứu thực nghiệm trong và ngoài nước [1-9], [18, 9] được dùng để đối chiếu với bối cảnh dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC.

Các văn bản pháp lý được phân tích gồm Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 [20]; các Nghị định số 212/2026/NĐ-CP [21], 217/2026/NĐ-CP [22], 207/2026/NĐ-CP [23], 210/2026/NĐ-CP [24] và 206/2026/NĐ-CP [25], lần lượt về điều kiện năng lực hoạt động xây dựng, quản lý hoạt động xây dựng, quản lý chất lượng công trình, hợp đồng xây dựng và chi phí đầu tư xây dựng; Luật Quy hoạch số 112/2025/QH15 [26]; Luật Phòng, chống tham nhũng [27]; Luật ĐTC [28]. Các tình huống rủi ro trong những nghiên cứu được trích dẫn được diễn giải theo khung pháp lý tại thời điểm phát sinh.

Một yếu tố được đưa vào danh mục khi đồng thời có khả năng ảnh hưởng đến mục tiêu dự án [10, 11], gắn được với nhóm S theo nội hàm trực tiếp và có nội hàm đủ rõ để định nghĩa, đánh giá thống nhất. Thông tin từ tài liệu và văn bản pháp luật được chuẩn hóa theo ba bước: tách yếu tố rủi ro khỏi hệ quả tổng hợp như chậm tiến độ, tăng chi phí, suy giảm chất lượng; hợp nhất các nội dung tương đồng; chuẩn hóa tên gọi, định nghĩa và mã hóa theo thuật ngữ quản lý dự án xây dựng tại Việt Nam [19]. Các cách diễn đạt cùng nội hàm và cùng nguồn phát sinh được hợp nhất; các yếu tố có biểu hiện tương tự được tách riêng khi khác nhau về nguồn quyết định, nghĩa vụ hoặc sản phẩm chuyên môn.

3. NHẬN DIỆN CÁC YẾU TỐ RỦI RO LIÊN QUAN ĐẾN ĐƠN VỊ TƯ VẤN

Theo ISO 31000:2018, rủi ro là tác động của sự không chắc chắn đến mục tiêu [10], gắn với phạm vi, tiến độ, chi phí, chất lượng và an toàn của dự án [11]. Mỗi yếu tố rủi ro ở trạng thái bất lợi khi mức đáp ứng của hoạt động tư vấn thấp hơn yêu cầu của dự án. Bên liên quan là chủ thể tác động đến hoặc chịu tác động từ việc thực hiện mục tiêu dự án [12]. Xét theo ba thuộc tính của Mitchell và cộng sự [13], đơn vị tư vấn có quyền lực chuyên môn thông qua ảnh hưởng của sản phẩm tư vấn đối với các quyết định kỹ thuật và quản lý; tính chính danh từ hợp đồng, tiêu chuẩn kỹ thuật và trách nhiệm nghề nghiệp [20, 21]; tính cấp thiết khi vấn đề chuyên môn cần được xử lý kịp thời để không ảnh hưởng đến quyết định và tiến độ dự án.

Theo lý thuyết đại diện, bất cân xứng thông tin giữa chủ đầu tư và đơn vị tư vấn biểu hiện ở hai dạng [16, 17]: Lựa chọn bất lợi, khi năng lực thực của tư vấn không được quan sát lúc ký kết hợp đồng và rủi ro đạo đức, khi nỗ lực và hành vi của tư vấn không được theo dõi đầy đủ trong quá trình thực hiện. Dạng thứ hai rõ nhất ở tư vấn giám sát: Đơn vị giám sát nhận thù lao từ chủ đầu tư nhưng phải xác nhận khách quan khối lượng và chất lượng công việc của nhà thầu, bên hưởng lợi trực tiếp từ kết quả xác nhận. Vì vậy, tính độc lập của giám sát phải được thiết lập bằng quy định pháp luật về giám sát, nghiệm thu và phòng, chống tham nhũng [20, 23, 27].

Từ các cơ sở trên, nhóm S có hai đặc tính cấu trúc. Thứ nhất là độ trễ bộc lộ giữa giai đoạn tạo lập giải pháp và giai đoạn thực hiện [2, 4]; thứ hai là vai trò kép: Đơn vị tư vấn vừa phát sinh rủi ro chuyên môn ở khâu khảo sát, thiết kế, thẩm tra, vừa là lớp kiểm soát đối với nhà thầu ở khâu giám sát, nghiệm thu. Suy giảm ở vai trò thứ hai tạo ra rủi ro bậc hai: Cơ chế phát hiện sai lệch đối với nhà thầu bị suy yếu, khiến sai lệch tác nghiệp tồn tại lâu hơn trước khi được xử lý.

Ranh giới của nhóm S được xác định theo hai quy tắc dựa trên đối chiếu pháp lý - chức năng, vận dụng lý thuyết thể chế [14, 15]. Ranh giới với chủ đầu tư nằm giữa trách nhiệm đối với sản phẩm và hoạt động chuyên môn của tư vấn với chức năng lựa chọn, giao nhiệm vụ, kiểm tra, chấp thuận và điều phối của chủ đầu tư [20, 28]: Sai sót thiết kế thuộc nhóm S, còn quản lý điều chỉnh hợp đồng hoặc chậm phê duyệt phương án xử lý thuộc chủ đầu tư hoặc cơ quan quản lý nhà nước theo thẩm quyền; với tư vấn quản lý dự án do chủ đầu tư thuê, quy tắc được áp dụng theo từng nhiệm vụ. Ranh giới với nhà thầu nằm giữa chức năng cung cấp, kiểm tra giải pháp chuyên môn với hoạt động trực tiếp thi công và cung ứng: Giải pháp thiết kế không phù hợp và sai lệch trong giám sát thuộc nhóm S dù bộc lộ khi thi công, còn vi phạm biện pháp hoặc quy trình thi công thuộc nhóm nhà thầu. Hai quy tắc này xác định chủ thể phát sinh chính; trách nhiệm chủ trì và phối hợp quản lý được xác định riêng theo chức năng, thẩm quyền và quan hệ hợp đồng.

Hoạt động tư vấn được tổ chức thành ba cụm chức năng: (V1) năng lực và sản phẩm chuyên môn; (V2) tương thích kỹ thuật và tiến độ hồ sơ; (V3) giám sát hiện trường và nghiệm thu. Sai lệch trong khảo sát, thiết kế hoặc thẩm tra truyền sang các hoạt động sử dụng sản phẩm tư vấn, trong khi chất lượng giám sát tác động trực tiếp đến thi công [2, 4]. Vì vậy, V1, V2 thuộc vai trò tạo lập giải pháp, V3 thuộc vai trò kiểm soát.

Đối với cụm V1, pháp luật xây dựng quy định điều kiện năng lực đối với tổ chức tư vấn, điều kiện hành nghề đối với cá nhân chủ trì khảo sát, thiết kế, thẩm tra, giám sát [20, 21], cùng yêu cầu đối với sản phẩm của từng loại hình tư vấn, kể cả dự toán xây dựng [22, 25]. Khi năng lực, kinh nghiệm hoặc mức độ tuân thủ quy trình, tiêu chuẩn kỹ thuật của đơn vị tư vấn không tương xứng với quy mô và độ phức tạp của dự án, hình thành yếu tố S1 - Khả năng đáp ứng yêu cầu chuyên môn của đơn vị tư vấn, tương ứng với vấn đề lựa chọn bất lợi [17]. Khi số liệu khảo sát, hồ sơ thiết kế, dự toán hoặc kết quả thẩm tra sai lệch, thiếu, không đồng bộ hoặc không phù hợp với thực tế hiện trường, hình thành yếu tố S2 - Tính chính xác của hồ sơ khảo sát, thiết kế. Chất lượng thiết kế thuộc nhóm rủi ro quan trọng nhất trong dự án đường bộ [2] và dự án xây dựng [5]; thay đổi thiết kế nhiều lần và dự toán không chuẩn xác được ghi nhận trong các dự án giao thông đô thị tại Hà Nội [1].

Đối với cụm V2, dự án CTGT chạy tuyến qua nhiều địa bàn, cắt qua hoặc song song với các công trình hạ tầng kỹ thuật hiện hữu như điện, viễn thông, cấp thoát nước, thủy lợi; sự phù hợp của giải pháp thiết kế với các công trình này và với quy hoạch có liên quan là yêu cầu của thiết kế xây dựng [20, 22, 26]. Khi phương án thiết kế không tương thích với hạ tầng hiện hữu, thi công phải dừng chờ di dời, hoàn trả hoặc điều chỉnh thiết kế, hình thành yếu tố S3 - Tính tương thích của giải pháp thiết kế với hạ tầng hiện hữu; chậm bàn giao mặt bằng hoặc chậm quyết định di dời thuộc chức năng của chủ đầu tư và cơ quan có thẩm quyền. Hợp đồng tư vấn xác định tiến độ cung cấp và hoàn thiện hồ sơ, kể cả hồ sơ điều chỉnh phát sinh [24]. Khi tiến độ này không được bảo đảm, các công việc phụ thuộc bị đình lại theo dây chuyền, hình thành yếu tố S4 - Thời gian cung cấp, điều chỉnh hồ sơ tư vấn, được tính theo thời gian thực hiện của tư vấn, tách khỏi thời gian thẩm định, phê duyệt của chủ đầu tư.

Đối với cụm V3, pháp luật quy định nội dung giám sát thi công, trách nhiệm kiểm tra, xác nhận khối lượng và trình tự nghiệm thu [20, 23]. Khi giám sát không được duy trì thường xuyên, liên tục hoặc không chủ động phát hiện, can thiệp các vấn đề chất lượng, kỹ thuật, tiến độ và an toàn, hình thành yếu tố S5 - Tính chủ động, liên tục của giám sát hiện trường; Iqbal và cộng sự xác định giám sát chặt chẽ và phối hợp trong quá trình thực hiện là nhóm biện pháp ứng phó rủi ro hiệu quả nhất trong dự án xây dựng [5]. Khi việc kiểm tra, đánh giá, nghiệm thu và xác nhận kết quả của nhà thầu thiếu khách quan, minh bạch hoặc chịu chi phối từ bên được kiểm tra, hình thành yếu tố S6 - Tính độc lập, khách quan trong giám sát, nghiệm thu. S5 phản ánh mức độ hiện diện, S6 phản ánh tính độc lập của phán quyết chuyên môn: Giám sát hiện diện nhưng thiếu độc lập vẫn bỏ qua sai lệch, còn giám sát độc lập nhưng gián đoạn bỏ sót sai lệch giữa các lần kiểm tra. Sáu yếu tố được tổng hợp tại Bảng 1.

Bảng 1. Danh mục yếu tố rủi ro sơ bộ liên quan đến đơn vị tư vấn (nhóm S) trong dự án xây dựng CTGT sử dụng vốn ĐTC

STT	Mã	Cụm chức năng	Tên yếu tố rủi ro	Nội dung
1	**S1**	V1	Khả năng đáp ứng yêu cầu chuyên môn của đơn vị tư vấn	Khả năng, kinh nghiệm chuyên môn của đơn vị tư vấn và mức độ tuân thủ quy trình, tiêu chuẩn kỹ thuật trong khảo sát, thiết kế, thẩm tra và giám sát.
2	**S2**	V1	Tính chính xác của hồ sơ khảo sát, thiết kế	Sự chính xác, đầy đủ, đồng bộ và phù hợp thực tế hiện trường của số liệu khảo sát, hồ sơ thiết kế, dự toán và kết quả thẩm tra.
3	**S3**	V2	Tính tương thích của giải pháp thiết kế với hạ tầng hiện hữu	Sự tương thích của giải pháp thiết kế với các công trình hạ tầng kỹ thuật hiện hữu trong phạm vi dự án (điện, viễn thông, cấp thoát nước, thủy lợi).
4	**S4**	V2	Thời gian cung cấp, điều chỉnh hồ sơ tư vấn	Tiến độ cung cấp, hoàn thiện hồ sơ khảo sát, thiết kế, dự toán, xử lý điều chỉnh phát sinh và kết quả thẩm tra.
5	**S5**	V3	Tính chủ động, liên tục của giám sát hiện trường	Mức độ giám sát thường xuyên, liên tục và chủ động phát hiện, can thiệp các vấn đề chất lượng, kỹ thuật, tiến độ, an toàn; bao gồm việc nghiệm thu, xác nhận khối lượng tại hiện trường.
6	**S6**	V3	Tính độc lập, khách quan trong giám sát, nghiệm thu	Mức độ độc lập, khách quan, minh bạch của tư vấn giám sát khi kiểm tra, đánh giá, nghiệm thu và xác nhận kết quả thực hiện của nhà thầu.

Bảng 2 truy vết nguồn học thuật, văn bản pháp lý và trạng thái bất lợi của từng yếu tố; trạng thái bất lợi là điểm neo để đánh giá khả năng xảy ra trong các bước định lượng tiếp theo.

Bảng 2. Ma trận truy vết căn cứ và trạng thái bất lợi của các yếu tố rủi ro nhóm S

Mã	Nguồn học thuật	Căn cứ pháp lý	Trạng thái bất lợi
S1	Lựa chọn bất lợi trong quan hệ ủy quyền [17]	Luật Xây dựng 135/2025/QH15 [20] Nghị định 212/2026/NĐ-CP [21] Nghị định 217/2026/NĐ-CP [22]	Năng lực, kinh nghiệm hoặc mức tuân thủ quy trình, tiêu chuẩn của đơn vị tư vấn thấp hơn yêu cầu của dự án.
S2	Chất lượng thiết kế [2, 5]; thay đổi thiết kế, dự toán không chuẩn xác [1]	Luật Xây dựng 135/2025/QH15 [20] Nghị định 217/2026/NĐ-CP [22] Nghị định 206/2026/NĐ-CP [25]	Số liệu khảo sát, hồ sơ thiết kế, dự toán hoặc kết quả thẩm tra sai, thiếu, không đồng bộ hoặc không phù hợp thực tế hiện trường.
S3	Công trình hạ tầng ngầm không lường trước [2]	Luật Xây dựng 135/2025/QH15 [20] Nghị định 217/2026/NĐ-CP [22] Luật Quy hoạch 112/2025/QH15 [26]	Giải pháp thiết kế không tương thích với vị trí, quy mô hoặc yêu cầu bảo vệ, di dời, đấu nối công trình hạ tầng hiện hữu.
S4	Thay đổi thiết kế nhiều lần [1]	Nghị định 217/2026/NĐ-CP [22]; Nghị định 210/2026/NĐ-CP [24]	Hồ sơ tư vấn được cung cấp, hoàn thiện hoặc điều chỉnh chậm hơn tiến độ yêu cầu.
S5	Rủi ro đạo đức - thiếu nỗ lực của bên được ủy quyền [17]; giám sát chặt chẽ là biện pháp ứng phó hiệu quả [5]	Luật Xây dựng 135/2025/QH15 [20] Nghị định 207/2026/NĐ-CP [23]	Giám sát gián đoạn, thiếu chủ động hoặc không kịp thời phát hiện, báo cáo, kiến nghị xử lý sai lệch.
S6	Quan hệ ủy quyền và bất cân xứng thông tin trong xác nhận kết quả [16, 17]	Luật Xây dựng 135/2025/QH15 [20] Nghị định 207/2026/NĐ-CP [23] Nghị định 210/2026/NĐ-CP [24] Luật Phòng, chống tham nhũng 36/2018/QH14 [27]	Kiểm tra, đánh giá, nghiệm thu hoặc xác nhận kết quả thiếu độc lập, khách quan, minh bạch.

Xét quan hệ nội hàm, S2, S4 và S5 là biểu hiện của năng lực chuyên môn tại S1 trên ba đối tượng: Chất lượng hồ sơ, tiến độ cung cấp hồ sơ và mức độ hiện diện của giám sát; S3 và S6 có nội hàm riêng, lần lượt gắn với hạ tầng hiện hữu và tính độc lập của phán quyết chuyên môn. Các biểu hiện được phát biểu riêng ở bước nhận diện để đánh giá đầy đủ từng khía cạnh; do cùng nguồn phát sinh, S2, S4 và S5 là đối tượng hợp nhất vào S1 ở bước chuẩn hóa.

Do sai lệch hồ sơ được nhân lên qua khối lượng thi công trước khi được phát hiện, kiểm soát rủi ro nhóm S được tổ chức từ hai phía. Đơn vị tư vấn chủ trì kiểm soát nội bộ chất lượng sản phẩm, phối hợp giữa các khâu khảo sát, thiết kế, thẩm tra, giám sát và kiểm soát thời gian xử lý các yêu cầu điều chỉnh. Chủ đầu tư lựa chọn tư vấn có năng lực phù hợp; tổ chức thẩm tra độc lập và hội thảo nhận diện rủi ro với sự tham gia của các bên [18]; bảo đảm điều kiện độc lập cho giám sát và theo dõi các chỉ báo về chất lượng và tiến độ hồ sơ tư vấn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xác lập hai quy tắc phân định ranh giới nhóm chủ thể tư vấn, ba cụm chức năng và sáu yếu tố rủi ro sơ bộ S1-S6 kèm căn cứ truy vết và trạng thái bất lợi. Rủi ro nhóm S có hai đặc tính cấu trúc: Độ trễ bộc lộ, khi sai lệch hình thành lúc tạo lập giải pháp nhưng xuất hiện khi thi công và vai trò kép, khi đơn vị tư vấn vừa phát sinh rủi ro chuyên môn ở cụm V1, V2, vừa là lớp kiểm soát nhà thầu ở cụm V3, khiến suy giảm ở V3 trở thành rủi ro bậc hai. S2, S4 và S5 là biểu hiện của năng lực chuyên môn tại S1, còn S3 và S6 có nội hàm riêng; cấu trúc này là căn cứ cho bước chuẩn hóa danh mục. Kiểm soát rủi ro nhóm S đòi hỏi kết hợp kiểm soát nội bộ của tư vấn với các công cụ lựa chọn, thẩm tra và theo dõi của chủ đầu tư. Danh mục S1-S6 là đầu vào cho các nghiên cứu định lượng tiếp theo về sàng lọc, quan hệ ảnh hưởng và mức độ ưu tiên của các yếu tố rủi ro.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Quốc Toản và Nguyễn Thị Thúy. Đánh giá rủi ro cho các dự án giao thông đô thị tại Hà Nội. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD), Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, tập 15, số 3V, tr. 177-185, 2021, doi: 10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-15.

[2] S. M. El-Sayegh and M. H. Mansour. Risk assessment and allocation in highway construction projects in the UAE. Journal of Management in Engineering, vol. 31, no. 6, Art. no. 04015004, 2015, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000365.

[3] D. Q. Tran and K. R. Molenaar. Impact of risk on design-build selection for highway design and construction projects. Journal of Management in Engineering, vol. 30, no. 2, pp. 153-162, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000210.

[4] S. Ghosh and J. Jintanapakanont. Identifying and assessing the critical risk factors in an underground rail project in Thailand: a factor analysis approach. International Journal of Project Management, vol. 22, no. 8, pp. 633-643, 2004, doi: 10.1016/j.ijproman.2004.05.004.

[5] S. Iqbal, R. M. Choudhry, K. Holschemacher, A. Ali and J. Tamošaitienė. Risk management in construction projects. Technological and Economic Development of Economy, vol. 21, no. 1, pp. 65-78, 2015, doi: 10.3846/20294913.2014.994582.

[6] N. Xia, J. Guo, and Y.-H. Lin. Managing stakeholder attributes for risk mitigation: evidence from construction project contractors. International Journal of Managing Projects in Business, vol. 14, no. 7, pp. 1605-1625, 2021, doi: 10.1108/IJMPB-11-2020-0345.

[7] H. M. Vo and J.-B. Yang. Incorporating stakeholder perception into risk assessment model: an empirical study of highway construction projects. Engineering, Construction and Architectural Management, vol. 33, no. 7, pp. 5244-5274, 2026, doi: 10.1108/ECAM-11-2024-1494.

[8] Nguyễn Lương Hải. Nghiên cứu sự ảnh hưởng của công tác lập kế hoạch đến hiệu quả hoạt động quản lý nhà nước trong đầu tư công xây dựng hạ tầng đường bộ tại Việt Nam. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD), Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, tập 13, số 3V, tr. 108-115, 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-12.

[9] Nguyễn Lương Hải. Nghiên cứu mô hình ảnh hưởng của hành vi tổ chức dự án đến chất lượng đạt được của các công trình xây dựng cơ sở hạ tầng giao thông tại Việt Nam. Transport and Communications Science Journal, tập 71, số 5, tr. 458-471, 2020, doi: 10.25073/tcsj.71.5.1.

[10] International Organization for Standardization. ISO 31000:2018, Risk Management - Guidelines. ISO, Geneva, 2018.

[11] Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 6th ed. Project Management Institute, 2017.

[12] R. E. Freeman. Strategic Management: A Stakeholder Approach. Cambridge University Press, 2010.

[13] R. K. Mitchell, B. R. Agle and D. J. Wood. Toward a theory of stakeholder identification and salience: defining the principle of who and what really counts. The Academy of Management Review, vol. 22, no. 4, pp. 853-886, 1997.

[14] P. J. DiMaggio and W. W. Powell. The iron cage revisited: institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. American Sociological Review, vol. 48, no. 2, pp. 147-160, 1983.

[15] W. R. Scott. Institutions and Organizations: Ideas, Interests and Identities, 4th ed. SAGE Publications, Thousand Oaks, CA, 2014.

[16] M. C. Jensen and W. H. Meckling. Theory of the firm: managerial behavior, agency costs and ownership structure. Journal of Financial Economics, vol. 3, no. 4, pp. 305-360, 1976.

[17] K. M. Eisenhardt. Agency theory: an assessment and review. The Academy of Management Review, vol. 14, no. 1, pp. 57-74, 1989.

[18] C. S. Goh, H. Abdul-Rahman and Z. Abdul-Samad. Applying risk management workshop for a public construction project: case study. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 139, no. 5, pp. 572-580, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000599.

[19] Đinh Tuấn Hải và Nguyễn Hữu Huế. Quản lý rủi ro trong xây dựng. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2016.

[20] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10/12/2025, Hà Nội, 2025.

[21] Chính phủ. Nghị định số 212/2026/NĐ-CP ngày 17/6/2026 quy định về điều kiện năng lực hoạt động xây dựng, Hệ thống thông tin, Cơ sở dữ liệu quốc gia về hoạt động xây dựng, Hà Nội, 2026.

[22] Chính phủ. Nghị định số 217/2026/NĐ-CP ngày 19/6/2026 về quản lý hoạt động xây dựng, Hà Nội, 2026.

[23] Chính phủ. Nghị định số 207/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng, Hà Nội, 2026.

[24] Chính phủ. Nghị định số 210/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 về hợp đồng xây dựng, Hà Nội, 2026.

[25] Chính phủ. Nghị định số 206/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 về quản lý chi phí đầu tư xây dựng, Hà Nội, 2026.

[26] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Quy hoạch số 112/2025/QH15 ngày 10/12/2025, Hà Nội, 2025.

[27] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Phòng, chống tham nhũng số 36/2018/QH14 ngày 20/11/2018; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 132/2025/QH15 ngày 10/12/2025, Hà Nội, 2018, 2025.

[28] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Đầu tư công số 58/2024/QH15 ngày 29/11/2024; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 90/2025/QH15 ngày 25/6/2025, Hà Nội, 2024, 2025.

■ Ngày nộp bài: 16/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 21/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 06/11/2026

Hoàn thiện quản trị rủi ro tín dụng tại Ngân hàng Chính sách xã hội tỉnh Lào Cai

Credit risk management at the Vietnam Bank for Social Policies in Lao Cai province

> TS NGUYỄN THỊ HẠNH*, THS PHẠM CAO CƯỜNG
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
*Email: hanhnt@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Ngân hàng Chính sách xã hội (NHCSXH) là tổ chức tín dụng đặc thù, thực hiện các chương trình tín dụng ưu đãi của Nhà nước, góp phần thúc đẩy giảm nghèo bền vững và phát triển kinh tế - xã hội tại các địa phương. Thời gian qua, NHCSXH tỉnh Lào Cai luôn không ngừng hoàn thiện quy trình quản lý tín dụng, nâng cao chất lượng giám sát vốn vay và tăng cường phối hợp với các tổ chức chính trị - xã hội nhận ủy thác. Trên cơ sở nghiên cứu thực trạng quản trị rủi ro tín dụng tại NHCSXH tỉnh Lào Cai, bài báo chỉ ra những hạn chế và đề xuất các khuyến nghị giải pháp nhằm nâng cao năng lực phòng ngừa, phát hiện và xử lý rủi ro tín dụng, qua đó góp phần nâng cao chất lượng hoạt động của NHCSXH tỉnh Lào Cai.

Từ khóa: Quản trị rủi ro, quản trị rủi ro tín dụng; Ngân hàng Chính sách xã hội; Ngân hàng Chính sách xã hội tỉnh Lào Cai.

ABSTRACT

The Vietnam Bank for Social Policies (VBSP) is a specialized credit institution that implements the State's preferential credit programs, contributing to sustainable poverty reduction and local socio-economic development. In recent years, the Lao Cai Provincial Branch of VBSP has continuously improved its credit management procedures, enhanced the quality of loan monitoring, and strengthened coordination with socio-political organizations entrusted with credit activities. Based on an analysis of the current state of credit risk management at the Lao Cai Provincial Branch of VBSP, this article identifies existing limitations and proposes solutions to strengthen the capacity to prevent, detect and address credit risks, thereby contributing to improving the branch's operational efficiency.

Keywords: Risk management; credit risk management, Vietnam Bank for Social Policies; Lao Cai Provincial Branch of the Vietnam Bank for Social Policies.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình hoạt động, NHCSXH tỉnh Lào Cai đạt được nhiều kết quả đáng ghi nhận. Tuy nhiên, quản trị rủi ro tín dụng tại đây vẫn còn có các hạn chế cần được khắc phục đó là: Hệ thống nhận diện và cảnh báo sớm chưa được tự động hóa đầy đủ; công tác đo lường rủi ro chưa được dựa trên hệ thống chỉ tiêu và mô hình phân tích chuyên biệt; chất lượng phối hợp và giám sát giữa các địa bàn chưa đồng đều... Do đó, nghiên cứu này đề cập đến các nội dung sau: (i) Thực trạng quản trị rủi ro tín dụng tại NHCSXH Tỉnh Lào Cai; (ii) Hạn chế; (iii) Khuyến nghị giải pháp nhằm hoàn thiện quản trị rủi ro tín dụng tại NHCSXH Tỉnh Lào Cai.

2. THỰC TRẠNG QUẢN TRỊ RỦI RO TÍN DỤNG TẠI NHCSXH TỈNH LÀO CAI GIAI ĐOẠN 2023 - 2025

2.1. Công cụ quản trị rủi ro tín dụng

Bảng 1. Tình hình sử dụng các công cụ quản trị rủi ro tín dụng chính sách tại NHCSXH tỉnh Lào Cai

Công cụ quản trị rủi ro	Tình trạng áp dụng	Mức độ hiệu quả	Ghi chú/Đề xuất cải thiện
1. Hệ thống cảnh báo sớm qua báo cáo định kỳ	Đã áp dụng	Trung bình - phù hợp điều kiện thủ công	Chưa tự động hóa, cần tích hợp phần mềm cảnh báo thời gian thực
2. Mô hình xếp hạng tín dụng nội bộ	Chưa áp dụng	-	Nên xây dựng bộ tiêu chí nội bộ theo lịch sử trả nợ, vi phạm hợp đồng
3. Giám sát cộng đồng qua tổ TK&VV	Đã áp dụng	Hiệu quả - linh hoạt, phù hợp điều kiện địa phương	Cần tăng cường năng lực tổ trưởng, tập huấn kỹ năng nhận diện rủi ro
4. Cơ sở dữ liệu tín dụng & quản lý CNTT nội bộ	Đã áp dụng cơ bản	Mức độ hỗ trợ lưu trữ tốt nhưng phân tích còn hạn chế	Thiếu hệ thống tích hợp và chức năng phân tích dự báo

5. Phần mềm hỗ trợ phân tích rủi ro, chấm điểm khách hàng	Chưa áp dụng	-	Nên đầu tư phần mềm phù hợp với NHCSXH cấp xã
6. Quỹ dự phòng rủi ro tín dụng	Đã áp dụng đúng quy trình	Tốt - xử lý an toàn, đúng quy định	Hồ sơ xử lý mất nhiều thời gian, phụ thuộc xác minh địa phương
7. Theo dõi Excel nâng cao theo tổ, địa bàn	Đã áp dụng	Tốt trong quản lý vi mô	Cần chuẩn hóa biểu mẫu, nâng cấp trình độ cán bộ phân tích
8. Công cụ truyền thông, vận động hộ vay qua hội đoàn thể	Đã áp dụng	Hữu hiệu trong nhóm vay cộng đồng	Nên kết hợp thêm công cụ phản ánh đa chiều từ người dân và chính quyền cơ sở

Nguồn: Tổng hợp từ thông tin nội bộ NHCSXH tỉnh Lào Cai.

Các công cụ trên hỗ trợ NHCSXH tỉnh Lào Cai theo dõi lịch sử trả nợ, tình hình sử dụng vốn và những trường hợp cần kiểm tra. Song, hệ thống công cụ quản trị rủi ro vẫn chủ yếu dựa vào phương pháp thủ công, chưa áp dụng đầy đủ hệ thống cảnh báo tự động, mô hình chấm điểm tín dụng nội bộ hoặc công cụ phân tích dự báo rủi ro chuyên biệt. Dữ liệu giữa các bộ phận chưa được tích hợp toàn diện theo thời gian thực nên việc tổng hợp và phân tích mất nhiều thời gian; chất lượng thông tin giám sát cộng đồng còn phụ thuộc vào năng lực của tổ trưởng và mức độ phối hợp của các tổ chức nhận ủy thác. Điều này làm tăng thời gian tổng hợp, gây khó khăn khi so sánh rủi ro giữa các địa bàn và làm giảm tính kịp thời của cảnh báo.

2.2. Quy trình quản trị rủi ro tín dụng

a) Nhận diện rủi ro tín dụng

Bảng 2. Kết quả nhận diện rủi ro tín dụng chính sách tại NHCSXH tỉnh Lào Cai giai đoạn 2023 - 2025

Đơn vị: Số tổ, số hộ gia đình, số lần, số hồ sơ

Chỉ tiêu nhận diện	2023	2024	2025	Ghi chú
1. Số tổ TK&VV có hộ vay vi phạm nghĩa vụ gửi tiết kiệm, họp tổ	22	31	35	Tăng nhẹ nhưng kiểm soát tốt, không phát sinh tổ yếu
2. Số hộ có đơn xin gia hạn	201	364	429	Tăng mạnh số hộ có hoàn cảnh (ốm đau, mất việc…), cần theo dõi chặt
3. Số trường hợp được tổ TK&VV cảnh báo sử dụng vốn sai mục đích	15	18	19	Tăng nhẹ, chủ yếu rơi vào nhóm vay tự doanh, cần theo dõi chặt
4. Số lần UBND xã, hội đoàn thể phản ánh rủi ro tín dụng cụ thể	17	28	27	Vai trò giám sát cộng đồng ngày càng phát huy
5. Tổ chức kiểm tra xác minh rủi ro trực tiếp tại tổ/hộ vay	13	21	26	Tăng cường kiểm tra đột xuất sau khi nhận tín hiệu cảnh báo
6. Hồ sơ rủi ro được lập, đưa vào danh mục theo dõi giám sát trọng điểm	7	11	9	Danh mục được theo dõi riêng theo quý, gắn trách nhiệm cán bộ phụ trách

Nguồn: NHCSXH tỉnh Lào Cai 2023 - 2025.

Ngân hàng CSXH tỉnh Lào Cai đã chú trọng đến việc nhận diện rủi ro nhưng số trường hợp được ghi nhận tăng không đồng nghĩa hoàn toàn với mức độ rủi ro thực tế gia tăng, bởi kết quả còn chịu ảnh hưởng của cường độ kiểm tra và khả năng phát hiện của ngân hàng. Vì thế, cần kết hợp số lượng cảnh báo với tỷ lệ xử lý kịp thời, tình hình trả nợ và mức độ tổn thất để đánh giá đầy đủ hơn hiệu quả nhận diện rủi ro. Việc tổng hợp và phân tích vẫn dựa nhiều vào báo cáo thủ công, chưa hình thành hệ thống cảnh báo tự động theo mức độ rủi ro, làm chậm quá trình phát hiện những khoản vay có dấu hiệu suy giảm khả năng trả nợ.

b) Đo lường rủi ro tín dụng

Bảng 3. Tổng hợp phương pháp đo lường rủi ro tín dụng tại NHCSXH tỉnh Lào Cai

Phương pháp đo lường	Nội dung thực hiện	Ghi chú áp dụng
1. Theo dõi tỷ lệ thu nợ gốc/lãi đúng hạn	So sánh định kỳ theo tổ, theo phường	Dữ liệu tổng hợp trong báo cáo nội bộ quý/năm
2. Lập danh sách khách hàng rủi ro hành vi	Dựa vào vi phạm cam kết, bỏ họp tổ, xin khoanh/gia hạn nợ	Cập nhật hàng quý, gắn trách nhiệm cán bộ địa bàn
3. Theo dõi tổ TK&VV có biểu hiện bất thường	Tổ có >1 hộ xin gia hạn hoặc phản ánh sử dụng sai mục đích	Phối hợp với hội đoàn thể và UBND phường
4. Phân tích theo địa bàn - chương trình vay	Tỷ lệ biến động giữa các nhóm vay (giải quyết việc làm, nhà ở xã hội…)	Chủ yếu áp dụng ở nhóm dư nợ lớn như NĐ 61/2015
5. Biểu mẫu Excel và biểu đồ cảnh báo đơn giản	Dựa trên số lượng vi phạm, biểu đồ xu hướng	Chưa có phần mềm tự động hóa
6. Kiểm tra thực tế hộ vay có dấu hiệu rủi ro	Rà soát 2 - 3 kỳ sau khi phát hiện, ghi biên bản xác minh	Gắn với quyết định xử lý hoặc xếp hạng tổ

Nguồn: Tổng hợp từ thông tin nội bộ NHCSXH tỉnh Lào Cai.

Hoạt động đo lường hiện dựa trên các chỉ tiêu như tổng dư nợ, dư nợ quá hạn, dư nợ khoanh, giá trị nợ được xóa, tình hình thu nợ gốc và lãi đúng hạn, cùng số lượng hộ vay có dấu hiệu bất thường. Việc phân tích theo địa bàn, chương trình tín dụng và tổ Tiết kiệm và vay vốn (TK&VV) có ý nghĩa trong xác định khu vực cần tăng cường giám sát. Song, hoạt động đo lường chưa được hỗ trợ đầy đủ bởi các mô hình định lượng chuyên biệt. Việc đánh giá mức độ rủi ro vẫn phụ thuộc đáng kể vào kinh nghiệm của cán bộ, khả năng cập nhật dữ liệu và chất lượng thông tin từ cơ sở. Do đó, khả năng so sánh mức độ rủi ro giữa các nhóm khách hàng và dự báo khả năng phát sinh nợ quá hạn còn hạn chế. Đây là vấn đề cần được khắc phục nhằm nâng cao chất lượng ra quyết định trong quản trị tín dụng.

c) Kiểm soát rủi ro tín dụng

Bảng 4. Kết quả kiểm soát rủi ro tín dụng chính sách tại NHCSXH tỉnh Lào Cai giai đoạn 2023 - 2025

Đơn vị tính: Lượt kiểm tra, số tổ

Chỉ tiêu kiểm soát	2023	2024	2025	Ghi chú đánh giá
1. Số lượt kiểm tra sau vay định kỳ	1.200	1.500	1.600	Bao gồm kiểm tra tại hộ vay, tổ TK&VV, trọng điểm ở nhóm hộ mới vay/lần đầu vi phạm

2. Số lượt kiểm tra đột xuất theo cảnh báo	500	550	480	Biến động qua các năm và giảm năm 2025 nhờ cảnh báo sớm từ tổ TK&VV và biểu mẫu nội bộ
3. Số tổ TK&VV bị "gắn cờ" theo dõi đặc biệt	45	64	62	Do có các hộ vi phạm nghĩa vụ hoặc nộp tiết kiệm dưới 70% số kỳ quy định
4. Số tổ TK&VV xếp loại yếu sau đánh giá quý	0	0	0	Không có tổ yếu do kịp thời kiểm tra và xử lý
5. Số tổ TK&VV được củng cố/tổ chức họp tổ bất thường theo yêu cầu của	31	26	28	Tập trung ở một số xã khó khăn
5. Số buổi họp giao ban tổ chức kiểm soát ba bên (NHCSXH - Hội đoàn thể - UBND)	4	4	4	Diễn ra hàng quý, có biên bản kiểm điểm rõ từng địa bàn
6. Tỷ lệ tổ TK&VV được kiểm tra ít nhất 1 lần/năm	100%	100%	100%	Duy trì thường xuyên từ năm 2023 đến nay

Nguồn: NHCSXH tỉnh Lào Cai 2023 - 2025.

NHCSXH tỉnh Lào Cai triển khai kiểm soát rủi ro theo hướng xuyên suốt trước, trong và sau khi cho vay. Trước khi giải ngân, việc bình xét đối tượng vay được thực hiện với sự tham gia của tổ TK&VV, tổ chức nhận ủy thác và các bên liên quan nhằm bảo đảm vốn đến đúng đối tượng, đúng mục đích. Sau giải ngân, ngân hàng theo dõi tình hình sử dụng vốn, kiểm tra các hộ mới vay, các trường hợp có dấu hiệu bất thường và những tổ có tỷ lệ chậm trả cao. Số liệu cho thấy ngân hàng đã chú trọng kết hợp giám sát định kỳ với kiểm tra theo dấu hiệu cảnh báo, đồng thời phát huy vai trò của tổ chức nhận ủy thác và chính quyền địa phương. Song, hiệu quả kiểm soát vẫn chịu ảnh hưởng bởi tính thủ công của hệ thống theo dõi, năng lực không đồng đều giữa các địa bàn và khả năng cập nhật thông tin. Việc hoàn thiện cơ chế cảnh báo sớm và chuẩn hóa quy trình kiểm tra sẽ giúp ngân hàng nâng cao khả năng phòng ngừa rủi ro ngay từ khi khoản vay chưa chuyển quá hạn.

d) Xử lý rủi ro tín dụng

Bảng 5. Kết quả xử lý nợ rủi ro tín dụng chính sách tại NHCSXH tỉnh Lào Cai giai đoạn 2023 - 2025

Đơn vị: Triệu đồng, hồ sơ, %

Chỉ tiêu	Năm 2023	Năm 2024	Năm 2025	Tổng
1. Số hồ sơ đề nghị xóa nợ được phê duyệt (hồ sơ)	7.784	7.352	4.912	20.048
2. Giá trị nợ được xóa (triệu đồng)	192.526	119.198	90.644	402.368
3. Số hồ sơ được khoanh nợ	20.768	22.005	16.046	58.819
4. Giá trị nợ khoanh phát sinh (triệu đồng)	406.824	444.385	336.714	1.187.923
5. Tỷ lệ hồ sơ xử lý có đủ xác minh từ tổ/UBND (%)	100	100	100	100

Nguồn: NHCSXH tỉnh Lào Cai 2023 – 2025.

Công tác xử lý nợ tại NHCSXH tỉnh Lào Cai giai đoạn 2023 - 2025 đã được triển khai tương đối tích cực, thể hiện qua việc thực hiện các biện pháp xóa nợ, khoanh nợ và duy trì tỷ lệ hồ sơ có đầy đủ xác minh ở mức 100%. Số lượng và giá trị nợ được xóa giảm dần trong giai đoạn nghiên cứu; quy mô khoanh nợ cũng giảm trong năm 2025 sau khi tăng vào năm 2024. Song, tổng giá trị nợ được xóa và khoanh vẫn ở mức đáng kể, cho thấy rủi ro tín dụng chính sách vẫn tồn tại và cần được quan tâm, quá trình xác minh và hoàn thiện hồ sơ vẫn kéo dài. Vì vậy, ngân hàng cần tiếp tục nâng cao chất lượng thẩm định, tăng cường kiểm tra sau cho vay, chủ động nhận diện các khoản vay có nguy cơ phát sinh rủi ro, đồng thời phối hợp chặt chẽ với chính quyền địa phương và các tổ chức nhận ủy thác trong công tác quản lý, đôn đốc và theo dõi, xử lý nợ nhằm nâng cao hiệu quả quản trị rủi ro tín dụng.

2.3. Kết quả quản trị rủi ro tín dụng giai đoạn 2023 - 2025

Bảng 6. Tỷ lệ nợ quá hạn tại NCSXH tỉnh Lào Cai

Đơn vị: Triệu đồng, %

Chỉ tiêu	Năm 2023	Năm 2024	Năm 2025	Tăng trưởng (%) 2024/2023	Tăng trưởng (%) 2025/2024
1. Tổng dư nợ TDCS	9.264.413	10.413.728	11.716.510	12,41	12,51
2. Dư nợ quá hạn	8.210,7	8.101,8	8.825,6	-1,33	8,93
3. Tỷ lệ nợ quá hạn (%)	0,089	0,078	0,075	-12,22	-3,18

Nguồn: NHCSXH tỉnh Lào Cai 2023 - 2025.

Số liệu cho thấy hoạt động tín dụng chính sách tại NHCSXH tỉnh Lào Cai trong giai đoạn 2023 - 2025 đạt được kết quả tích cực trên phương diện mở rộng quy mô tín dụng và kiểm soát tỷ lệ nợ quá hạn. Song, việc dư nợ quá hạn tăng 8,93% trong năm 2025 cũng đặt ra yêu cầu tiếp tục nâng cao năng lực dự báo, tăng cường công tác giám sát sau cho vay, rà soát các khoản vay có nguy cơ chuyển quá hạn, đôn đốc thu hồi nợ, chủ động xử lý các khoản nợ có vấn đề nhằm bảo đảm an toàn nguồn vốn tín dụng và nâng cao trách nhiệm của các tổ chức nhận ủy thác, tổ tiết kiệm và vay vốn.

3. HẠN CHẾ

Bên cạnh những kết quả đạt được, công tác quản trị rủi ro tín dụng tại NHCSXH tỉnh Lào Cai vẫn còn một số hạn chế.

Một là, hệ thống nhận diện và cảnh báo sớm chưa được tự động hóa đầy đủ. Việc tổng hợp thông tin chủ yếu dựa trên báo cáo định kỳ, biểu mẫu thủ công và bảng tính Excel, khiến quá trình phát hiện, phân loại và phản ứng với rủi ro có thể bị chậm trễ.

Hai là, công tác đo lường rủi ro chưa dựa trên hệ thống chỉ tiêu và mô hình phân tích chuyên biệt. Ngân hàng chưa áp dụng đầy đủ công cụ chấm điểm tín dụng nội bộ và phân loại khách hàng tự động theo mức độ rủi ro. Vì vậy, việc đánh giá vẫn phụ thuộc tương đối lớn vào kinh nghiệm của cán bộ và chất lượng thông tin tại cơ sở.

Ba là, chất lượng phối hợp và giám sát giữa các địa bàn chưa đồng đều. Hiệu quả phát hiện rủi ro phụ thuộc vào năng lực của cán bộ phụ trách địa bàn, tổ trưởng TK&VV và các tổ chức nhận ủy thác.

Một số trường hợp có dấu hiệu bất thường có thể chưa được phản ánh đầy đủ hoặc kịp thời.

Bốn là, nợ khoanh và nợ quá hạn vẫn có những biến động cần theo dõi. Dù tỷ lệ nợ quá hạn giảm, giá trị nợ quá hạn năm 2025 vẫn ở mức cao. Dư nợ quá hạn trong năm 2024 giảm nhưng đến năm 2025 tăng mạnh. Điều này cho thấy, khả năng trả nợ của một bộ phận khách hàng vẫn chịu tác động từ các yếu tố khách quan và điều kiện sinh kế.

Năm là, quá trình xử lý rủi ro còn có thể mất nhiều thời gian do phải xác minh hoàn cảnh, thiệt hại và khả năng trả nợ của hộ vay. Việc phối hợp nhiều bên giúp bảo đảm tính xác thực nhưng đồng thời làm tăng yêu cầu về hồ sơ, thời gian xử lý và công tác theo dõi sau xử lý.

4. KHUYẾN NGHỊ GIẢI PHÁP NHẰM HOÀN THIỆN QUẢN TRỊ RỦI RO TẠI NHCSXH TỈNH LÀO CAI

Một là, hoàn thiện hệ thống nhận diện và cảnh báo sớm rủi ro tín dụng: NHCSXH tỉnh Lào Cai cần chuẩn hóa danh mục dữ liệu tối thiểu của từng khoản vay, gồm thông tin chương trình, lịch trả nợ, tình trạng trả nợ, kết quả kiểm tra sau vay, biến động hoàn cảnh hộ vay và phản ánh từ tổ TK&VV. Trên cơ sở dữ liệu được phép khai thác, ngân hàng có thể thiết lập các dấu hiệu cảnh báo như chậm trả, nhiều kỳ không thực hiện nghĩa vụ tiết kiệm theo quy định, thay đổi nơi cư trú, phương án sản xuất bị gián đoạn hoặc có thông tin thiên tai, dịch bệnh ảnh hưởng đến sinh kế. Ngân hàng cần quy định rõ người tiếp nhận cảnh báo, thời hạn xác minh, cấp có thẩm quyền quyết định biện pháp tiếp theo và cách ghi nhận kết quả. Trước khi triển khai phần mềm mới, ngân hàng chuẩn hóa biểu mẫu điện tử và bảng theo dõi dùng chung trong phạm vi được phép, bảo đảm phân quyền truy cập, bảo mật dữ liệu cá nhân và lưu vết chỉnh sửa.

Hai là, xây dựng hệ thống chỉ tiêu và công cụ đo lường rủi ro tín dụng phù hợp: Ngân hàng CSXH tỉnh Lào Cai cần xây dựng bộ chỉ tiêu theo dõi thống nhất, tối thiểu gồm tỷ lệ nợ quá hạn, tỷ lệ thu nợ đến hạn, dư nợ khoanh, số khoản vay có dấu hiệu bất thường, tỷ lệ cảnh báo được xác minh đúng hạn và tỷ lệ kiến nghị sau kiểm tra được khắc phục. Mỗi chỉ tiêu cần có công thức, nguồn dữ liệu, tần suất cập nhật, đơn vị chịu trách nhiệm và ngưỡng cần báo cáo. Việc phân loại khoản vay hoặc địa bàn cần dựa trên tiêu chí phù hợp với đặc thù tín dụng chính sách, kết hợp thông tin định lượng với xác minh thực tế. Không nên áp dụng máy móc mô hình chấm điểm tín dụng thương mại hoặc sử dụng tiêu chí có thể gây bất lợi cho người vay thuộc nhóm chính sách. Mọi công cụ phân loại mới cần được thẩm định, thử nghiệm và phê duyệt theo quy định của Ngân hàng.

Ba là, nâng cao chất lượng phối hợp và giám sát tín dụng giữa các địa bàn: Ngân hàng CSXH tỉnh Lào Cao cần rà soát quy chế phối hợp giữa ngân hàng, chính quyền cấp xã, các tổ chức chính trị - xã hội nhận ủy thác và tổ TK&VV; quy định cụ thể trách nhiệm trong bình xét cho vay, kiểm tra mục đích sử dụng vốn, đôn đốc trả nợ, xác minh hoàn cảnh và báo cáo dấu hiệu rủi ro. Bên cạnh đó, ngân hàng tổ chức tập huấn định kỳ cho cán bộ và tổ trưởng TK&VV về nhận diện dấu hiệu bất thường, lập biên bản, bảo vệ thông tin người vay và chuyển thông tin đúng đầu mối. Hoạt động kiểm tra nên được phân bổ theo mức độ rủi ro, không chỉ dựa trên số lượng lượt kiểm tra. Đối với địa bàn có biến động nợ quá hạn, nợ khoanh hoặc nhiều cảnh báo cần được ưu tiên kiểm tra chuyên đề. Sau kiểm tra, phải có kết luận, thời hạn khắc phục và kiểm tra lại đối với kiến nghị trọng yếu.

Bốn là, tăng cường quản lý nợ quá hạn, nợ khoanh và hỗ trợ khả năng trả nợ của khách hàng: Đối với nợ quá hạn, ngân hàng CSXH tỉnh Lào Cai cần phân nhóm nguyên nhân như khó khăn khách quan về sinh kế, thiên tai/dịch bệnh, sử dụng vốn không đúng mục đích, thay đổi nơi cư trú hoặc nguyên nhân khác. Trên cơ sở đó, xây dựng phương án đôn đốc, hỗ trợ hoặc xử lý phù hợp với quy định, tránh áp dụng một biện pháp chung cho mọi trường hợp. Đối với nợ khoanh, cần theo dõi thời hạn, tình trạng phục hồi sinh kế và khả năng trả nợ sau thời gian khoanh; định kỳ rà soát hồ sơ để đề xuất phương án theo đúng thẩm quyền. Đồng thời, phối hợp với cơ quan chuyên môn và chính quyền địa phương hướng dẫn người vay sử dụng vốn hiệu quả, kết nối thông tin về kỹ thuật sản xuất, thị trường tiêu thụ và các chương trình hỗ trợ sinh kế.

Năm là, rút ngắn quy trình xử lý rủi ro và nâng cao hiệu quả phối hợp trong giải quyết nợ có vấn đề: Ngân hàng CSXH tỉnh Lào Cai cần chuẩn hóa danh mục hồ sơ, biểu mẫu xác minh thiệt hại, tài liệu chứng minh hoàn cảnh và quy trình thẩm định cho từng loại đề nghị xử lý. Trong mỗi khâu tiếp nhận, xác minh, thẩm định, trình phê duyệt và thông báo kết quả cần có đầu mối, thời hạn xử lý và cơ chế nhắc việc Ngân hàng nên sử dụng công cụ theo dõi tiến độ hồ sơ để nhận diện khâu thường xuyên bị chậm hoặc phải bổ sung nhiều lần. Việc rút ngắn quy trình không đồng nghĩa cắt bỏ bước xác minh bắt buộc. Mục tiêu là giảm trùng lặp giấy tờ, chuẩn hóa yêu cầu ngay từ đầu và tăng trao đổi giữa các bên. Sau khi xử lý, ngân hàng cần theo dõi tình hình phục hồi sản xuất, việc sử dụng vốn và khả năng thực hiện nghĩa vụ tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Quản trị rủi ro tín dụng giữ vai trò quan trọng trong việc bảo đảm an toàn nguồn vốn, nâng cao chất lượng tín dụng và duy trì hiệu quả hoạt động của NHCSXH. Qua phân tích thực trạng giai đoạn 2023 - 2025, NHCSXH tỉnh Lào Cai đã đạt được những kết quả tích cực trong kiểm soát nợ quá hạn, nâng cao tỷ lệ thu hồi nợ đúng hạn và tăng cường phối hợp giám sát tín dụng tại cơ sở. Tuy nhiên, công tác quản trị rủi ro vẫn còn một số hạn chế liên quan đến hệ thống cảnh báo sớm, công cụ đo lường rủi ro, chất lượng giám sát giữa các địa bàn và tiến độ xử lý nợ có vấn đề. Vì vậy, ngân hàng cần triển khai đồng bộ các giải pháp trên sẽ góp phần nâng cao năng lực quản trị rủi ro tín dụng tại NHCSXH tỉnh Lào Cai, bảo toàn nguồn vốn tín dụng chính sách và thúc đẩy mục tiêu giảm nghèo bền vững, phát triển kinh tế - xã hội tại địa phương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Các tổ chức tín dụng, số 32/2024/QH15, ngày 18 tháng 01 năm 2024, có hiệu lực thi hành từ ngày 01/7/2024, 2024.

[2] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1990/QĐ-TTg ngày 26/11/2021 về giảm lãi suất cho vay các chương trình tín dụng chính sách tại NHCSXH, 2021.

[3] NHCSXH tỉnh Lào Cai. Báo cáo tổng kết hoạt động tín dụng chính sách năm 2025, 2025.

[4] NHCSXH tỉnh Lào Cai (2023 - 2025). Các báo cáo, tài liệu nội bộ.

[5] Nguyễn Thùy Dương. Giáo trình Quản trị rủi ro trong hoạt động kinh doanh ngân hàng, NXB. Học viện Ngân hàng, 2023.

■ Ngày nộp bài: 10/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/11/2026

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam

A study of factors affecting the effectiveness of road - air transport connectivity for air cargo in Vietnam

> TS NGÔ ĐỨC PHƯỚC
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
Email: phuoc.ngo@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu xem xét các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam. Kết quả phân tích dữ liệu khảo sát 485 mẫu với 35 biến quan sát cho thấy 6 yếu tố tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối, theo thứ tự hệ số hồi quy chuẩn hóa: Hạ tầng giao thông đường bộ kết nối cảng hàng không (β = 0,286); Năng lực vận tải đường bộ trung chuyển (β = 0,259); Năng lực nhà ga và kho hàng hóa hàng không (β = 0,216), Mức độ phối hợp giữa các bên tham gia (β = 0,153); Ứng dụng công nghệ thông tin và trao đổi dữ liệu (β = 0,109) và Mức độ thuận lợi của thủ tục hải quan và giao nhận (β = 0,094). Kết quả nghiên cứu này giúp cho việc rà soát giải quyết các "điểm nghẽn" để nâng cao hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không.

Từ khóa: Hiệu quả kết nối vận tải; vận tải đường bộ; vận tải hàng không; hàng hóa hàng không.

ABSTRACT

This study examines the factors affecting the effectiveness of road - air transport connectivity for air cargo in Vietnam. The analysis of survey data comprising 485 observations and 35 observed variables indicates that six factors have a positive impact on connectivity effectiveness, ranked by their standardized regression coefficients: Road Transport Infrastructure Connecting to Airports (β = 0.286), Feeder Road Transport Capacity (β = 0.259), Air Cargo Terminal and Warehouse Capacity (β = 0.216), Coordination among Stakeholders (β = 0.153), Information Technology Application and Data Exchange (β = 0.109) and Ease of Customs Clearance and Cargo Receipt and Delivery Procedures (β = 0.094). These findings provide a basis for identifying and addressing bottlenecks to improve the effectiveness of road-air transport connectivity for air cargo.

Keywords: Transport connectivity effectiveness; road transport; air transport; air cargo.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không, không chỉ phụ thuộc vào một yếu tố đơn lẻ mà còn chịu tác động đồng thời của hạ tầng tiếp cận cảng hàng không, năng lực nhà ga hàng hóa, thời gian và chi phí chặng đường bộ, thủ tục hải quan, sự phối hợp giữa các bên và ứng dụng công nghệ thông tin [1, 2, 3].

Tại Việt Nam, cùng với tăng trưởng thương mại, vận tải hàng không đảm nhận khoảng 25% giá trị xuất nhập khẩu, chủ yếu là hàng giá trị cao, nhạy cảm về thời gian [4] và hàng hóa này được gom, phân phối chủ yếu bằng đường bộ. Hiện nay, chặng đường bộ do doanh nghiệp vận tải nhỏ đảm nhận, kết nối chủ hàng với nhà vận tải còn dựa vào quan hệ cá nhân [5], trong khi thiếu phối hợp giữa doanh nghiệp giao nhận, nhà vận tải và nhà ga hàng hóa gây thời gian chờ giao, nhận hàng [2]. Bên cạnh đó, chưa có hệ thống tiêu chí khoa học đánh giá hiệu quả kết nối và nghiên cứu trong nước chủ yếu tập trung vào chất lượng dịch vụ logistics hàng không, còn ít nghiên cứu định lượng về kết nối vận tải đường bộ - hàng không. Ngoài ra, ùn tắc giao thông đô thị, hạn chế giờ xe tải vào đô thị, số nhà ga hàng hóa và trung tâm logistics hàng không còn ít cùng mức độ số hóa thấp làm giảm hiệu quả kết nối [4, 5]. Mặc dù Quy hoạch hệ thống cảng hàng không thời kỳ 2021 - 2030 với Cảng hàng không quốc tế Long Thành, mở rộng Tân Sơn Nhất, Nội Bài [6] cùng cao tốc kết nối được kỳ vọng nâng cao năng lực phục vụ hàng hóa, song hiệu quả kết nối vẫn hạn chế do thời gian chặng đường bộ thiếu ổn định, thủ tục giao nhận kéo dài. Việc nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam là cần thiết nhằm cung cấp căn cứ cho doanh nghiệp và cơ quan quản lý nâng cao hiệu quả

kết nối, giảm thời gian, chi phí logistics và phát triển vận tải đa phương thức phục vụ hàng hóa hàng không.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không

Hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không thể hiện ở mức độ thông suốt khi hàng hóa được đưa đến cảng, tiếp nhận tại nhà ga và chuyển sang chặng bay. Thời gian chuyển tiếp [7], chi phí và độ tin cậy trong giao nhận là những khía cạnh cần xem xét.

Hạ tầng giao thông đường bộ kết nối cảng hàng không: Boonekamp và Burghouwt [7] đã chỉ ra vùng thu hút hàng hóa rộng hơn hành khách, bởi hàng được chở bằng xe tải. Thực tế, Lam và cộng sự [5] nhấn mạnh ùn tắc đô thị, thiếu đường chuyên dụng làm giảm năng suất, còn Ghosh và cộng sự [8] khẳng định đầu tư hạ tầng giảm ùn tắc hiệu quả nhất, vì vậy giả thuyết được đưa ra:

H_1: Hạ tầng giao thông đường bộ kết nối cảng hàng không tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

Năng lực nhà ga và kho hàng hóa hàng không: Bombelli và Fazi [2] chỉ ra mặt bằng kho hạn chế khiến xe phải chờ. Bên cạnh đó, Ou và cộng sự [9] nhấn mạnh lô hàng chưa chuyển thẳng lên chuyến bay buộc phải lưu kho. Đáng chú ý, Ngân hàng Thế giới [4] nhận định chỉ 4/22 cảng hàng không Việt Nam có nhà ga hàng hóa riêng, nên giả thuyết được đề xuất:

H_2: Năng lực nhà ga và kho hàng hóa hàng không tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

Năng lực vận tải đường bộ trung chuyển: Nghiên cứu của Heinitz và cộng sự [1] đã khẳng định đường bộ không chỉ gom, giao hàng mà còn trung chuyển hàng hóa hàng không. Theo hướng này, Beifert [10] cho thấy RFS dùng xe tải thay chuyến bay, trong khi Lam và cộng sự [5] chỉ ra doanh nghiệp vận tải trong nước nhỏ lẻ, chạy rỗng nhiều, từ đó hình thành giả thuyết nghiên cứu:

H_3: Năng lực vận tải đường bộ trung chuyển tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

Mức độ thuận lợi của thủ tục hải quan và giao nhận: Phản ánh mức độ dễ dàng và kịp thời khi hoàn tất chứng từ và bàn giao hàng hóa. Djankov và cộng sự [11] chỉ ra mỗi ngày chậm trễ trước khi xuất khẩu làm giảm thương mại ít nhất 1%. Tương tự, Volpe Martincus và cộng sự [12] nhận định xử lý hải quan kéo dài làm giảm xuất khẩu, còn Luật Hải quan [13] quy định thủ tục hải quan điện tử, chính vì thế giả thuyết được xác định:

H_4: Mức độ thuận lợi của thủ tục hải quan và giao nhận tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

Mức độ phối hợp giữa các bên tham gia: Cho thấy sự thống nhất về trách nhiệm, lịch giao nhận và thông tin lô hàng giữa các bên. Bombelli và Fazi [2] cho thấy thời gian chờ tăng khi doanh nghiệp giao nhận thiếu phối hợp, ngược lại giảm nhờ điều phối tập trung. Đồng thời, Ghosh và cộng sự [8] phân tích ùn tắc do xe tải đến thiếu điều phối. Tổng quát hơn, Feng và cộng sự [14] chỉ ra hãng hàng không, doanh nghiệp giao nhận, nhà ga có bài toán khác nhau, do đó giả thuyết được đặt ra:

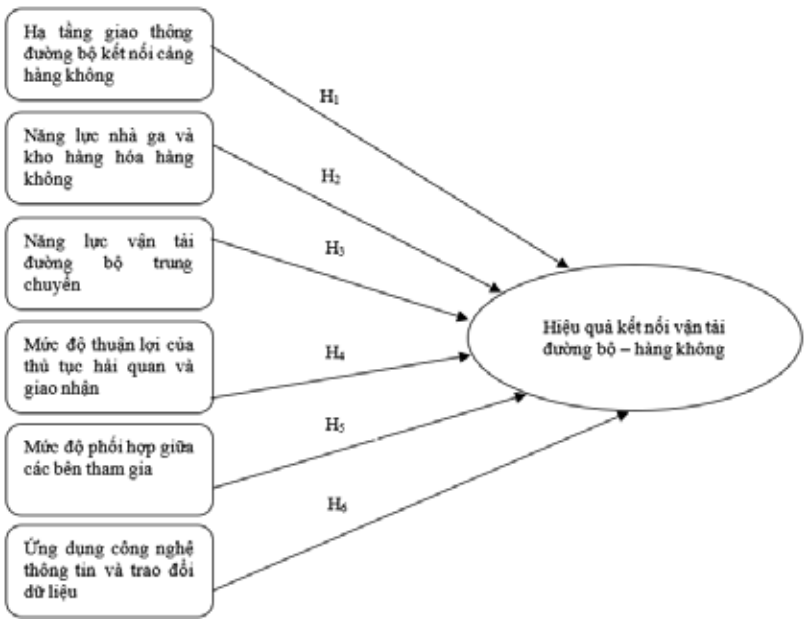
H_5: Mức độ phối hợp giữa các bên tham gia tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

Ứng dụng công nghệ thông tin và trao đổi dữ liệu: Jurgelāne-Kaldava và cộng sự [3] đã xác định dữ liệu rời rạc là thách thức chính, từ đó đề xuất chuẩn ONE Record. Song song, Ngân hàng Thế giới [15] nhấn mạnh hệ thống cộng đồng hàng hóa, đặt lịch xe giảm thời gian chờ, còn Suwanwong và cộng sự [16] khuyến nghị dùng vận đơn hàng không điện tử, vì vậy giả thuyết được đề nghị:

H_6: Ứng dụng công nghệ thông tin và trao đổi dữ liệu tác động cùng chiều đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam.

2.2. Mô hình nghiên cứu yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không

Dựa trên nền tảng lý thuyết và các nghiên cứu thực nghiệm trước đây về kết nối vận tải đường bộ - hàng không, kết hợp kết quả phỏng vấn sâu 12 chuyên gia để hiệu chỉnh mô hình nghiên cứu, hoàn thiện thang đo và bổ sung các biến quan sát phù hợp với thực tiễn tại Việt Nam, mô hình nghiên cứu đề xuất được xây dựng và trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không tại Việt Nam

Nguồn: Tác giả tổng hợp

Để đánh giá được mức độ tác động của các yếu tố, nghiên cứu khảo sát 485 nhà quản lý và nhân viên, trực tiếp giao nhận, vận chuyển hàng hóa giữa đường bộ và nhà ga hàng hóa tại các cảng hàng không Nội Bài, Tân Sơn Nhất và Đà Nẵng. Họ thuộc các doanh nghiệp giao nhận, vận tải đường bộ, nhà ga hàng hóa, hãng hàng không và doanh nghiệp xuất nhập khẩu tự tổ chức giao nhận. Dữ liệu được làm sạch, mã hóa và xử lý bằng phần mềm SPSS 24.0 thông qua các kỹ thuật thống kê mô tả, kiểm định Cronbach's Alpha, phân tích nhân tố khám phá (EFA) và phân tích hồi quy tuyến tính để kiểm định mô hình nghiên cứu.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Đánh giá thang đo bằng hệ số tin cậy Cronbach's Alpha

Trước khi phân tích nhân tố, việc kiểm định độ tin cậy của thang đo là cần thiết [17]. Các thang đo được xem xét theo tiêu chí hệ số Cronbach's Alpha từ 0,70 trở lên và hệ số tương quan biến-tổng đã hiệu chỉnh lớn hơn 0,30 [18].

Bảng 1. Tóm tắt kết quả kiểm định Cronbach's Alpha

STT	Ký hiệu	Thành phần	Số biến	Cronbach's Alpha	Hệ số tương quan biến - tổng thấp nhất
1	HT	Hạ tầng giao thông đường bộ kết nối cảng hàng không	6	0,919	0,749
2	NG	Năng lực nhà ga và kho hàng hóa hàng không	5	0,909	0,749
3	VT	Năng lực vận tải đường bộ trung chuyển	6	0,918	0,742
4	TT	Mức độ thuận lợi của thủ tục hải quan và giao nhận	5	0,901	0,738
5	PH	Mức độ phối hợp giữa các bên tham gia	6	0,928	0,770
6	CN	Ứng dụng công nghệ thông tin và trao đổi dữ liệu	4	0,884	0,726
7	HQ	Hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không phục vụ hàng hóa hàng không	3	0,838	0,679

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả.

Kiểm định Cronbach's Alpha cho thấy bảy thang đo dao động từ 0,838 đến 0,928; tương quan biến-tổng thấp nhất của từng thang đo dao động từ 0,679 đến 0,770. Tất cả đều đạt tiêu chí đã xác lập. Không có biến quan sát nào bị loại: 32 biến thuộc 6 yếu tố độc lập và 3 biến đo hiệu quả kết nối được đưa vào phân tích EFA.

3.2. Phân tích nhân tố khám phá EFA

Kết quả phân tích EFA đối với 32 biến quan sát của sáu yếu tố độc lập cho thấy KMO đạt 0,895; kiểm định Bartlett cho $\chi^2(496) = 10.069,945$ với $p < 0,001$ [19], [20]. Phân tích thành phần chính kết hợp phép quay Varimax rút trích sáu nhân tố có eigenvalue lớn hơn 1; tổng phương sai trích đạt 72,746%. Chỉ số Eigenvalue của nhân tố thứ sáu là 2,643, trong khi thành phần thứ bảy chỉ đạt 0,504.

Bảng 2. Kết quả phân tích nhân tố khám phá EFA các biến độc lập

Biến quan sát	HT	NG	VT	TT	PH	CN
HT_1	0,816					
HT_2	0,846					
HT_3	0,827					
HT_4	0,840					
HT_5	0,851					
HT_6	0,854					
NG_1		0,838				
NG_2		0,846				
NG_3		0,862				
NG_4		0,838				
NG_5		0,852				
VT_1			0,852			
VT_2			0,814			
VT_3			0,832			
VT_4			0,823			
VT_5			0,858			
VT_6			0,829			
TT_1				0,836		
TT_2				0,834		
TT_3				0,850		
TT_4				0,844		
TT_5				0,849		
PH_1					0,859	
PH_2					0,847	
PH_3					0,840	
PH_4					0,869	
PH_5					0,843	
PH_6					0,846	
CN_1						0,860
CN_2						0,873
CN_3						0,835
CN_4						0,846

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả.

Đối với biến phụ thuộc HQ, chỉ số KMO đạt 0,723; Bartlett $\chi^2(3) = 578,259$, $p < 0,001$. Một thành phần có eigenvalue 2,267, giải thích 75,575% phương sai; hệ số tải của HQ_1, HQ_2 và HQ_3 lần lượt là 0,856; 0,868 và 0,884, khẳng định 3 biến quan sát hội tụ tốt vào một nhân tố duy nhất và đáp ứng yêu cầu về giá trị hội tụ.

3.3. Phân tích tương quan và phân tích hồi quy

Kết quả phân tích tương quan Pearson giữa HQ với HT, NG, VT, TT, PH và CN lần lượt đạt 0,368; 0,333; 0,375; 0,177; 0,279 và 0,221; tất cả có $p < 0,001$ cho thấy các biến trong mô hình đều có mối tương quan có ý nghĩa thống kê. Trên cơ sở đó, phân tích hồi quy tuyến tính bội được thực hiện theo phương pháp Enter, với kết quả được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả phân tích hồi quy

Mô hình	Hệ số chưa chuẩn hóa		Hệ số đã chuẩn hóa	Giá trị t	Mức ý nghĩa (Sig.)	Đa cộng tuyến	
	B	Sai số chuẩn	Beta			Độ chấp nhận	VIF
Hằng số C	-0,638	0,242		-2,639	0,009		
HT	0,316	0,041	0,286	7,646	0,000	0,963	1,038
NG	0,231	0,041	0,216	5,696	0,000	0,932	1,073
VT	0,290	0,043	0,259	6,822	0,000	0,935	1,070
TT	0,103	0,041	0,094	2,536	0,012	0,969	1,032
PH	0,164	0,041	0,153	4,045	0,000	0,941	1,062
CN	0,115	0,040	0,109	2,899	0,004	0,949	1,054
Biến phụ thuộc: HQ							
R^2 chưa hiệu chỉnh: 0,357							
R^2 hiệu chỉnh: 0,349							
Thống kê F (ANOVA): 44,2							
Mức ý nghĩa Sig. (ANOVA): 0,000							
Durbin-Watson: 1,624							

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả

Kết quả hồi quy cho thấy mô hình phù hợp với dữ liệu nghiên cứu (F = 44,2; Sig. = 0,000). Hệ số R^2 hiệu chỉnh đạt 0,349, cho thấy sáu yếu tố giải thích được 34,9% sự biến thiên của hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không. Hệ số Durbin-Watson đạt 1,624, nằm trong khoảng 1,5 - 2,5 nên không có dấu hiệu tự tương quan; VIF của 6 biến độc lập dao động từ 1,032 đến 1,073 và độ chấp nhận đều lớn hơn 0,9, cho thấy không có hiện tượng đa cộng tuyến. Cả 6 hệ số hồi quy đều dương và có ý nghĩa thống kê (Sig. < 0,05), do đó các giả thuyết H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 và H_6 được chấp nhận. Theo hệ số Beta chuẩn hóa, mức độ tác động giảm dần là HT (0,286), VT (0,259), NG (0,216), PH (0,153), CN (0,109) và TT (0,094). Phương trình hồi quy theo hệ số chưa chuẩn hóa là:

$$HQ = -0{,}638 + 0{,}316HT + 0{,}231NG + 0{,}290VT + 0{,}103TT + 0{,}164PH + 0{,}115CN.$$

4. CÁC HÀM Ý QUẢN TRỊ ĐỀ XUẤT

Để nâng cao hiệu quả kết nối vận tải đường bộ - hàng không, các giải pháp cần được ưu tiên theo mức độ tác động của từng yếu tố. Đối với hạ tầng giao thông đường bộ kết nối cảng hàng không (β = 0,286), cơ quan quản lý giao thông và đơn vị khai thác cảng cần đánh giá khả năng tiếp cận khu hàng hóa bằng đường bộ. Đối với năng lực vận tải đường bộ trung chuyển (β = 0,259), doanh nghiệp vận tải đường bộ cần đối chiếu năng lực trung chuyển với nhu cầu giao nhận, đầu tư đội xe chuyên dụng và phát triển dịch vụ vận tải trung chuyển giữa các cảng hàng không. Đối với năng lực nhà ga và kho hàng hóa hàng không (β = 0,216), doanh nghiệp khai thác nhà ga cần tăng số cửa giao nhận, mở rộng kho và áp dụng cơ chế đặt lịch xe đến nhà ga.

Đối với mức độ phối hợp giữa các bên tham gia (β = 0,153), tại các điểm bàn giao, doanh nghiệp giao nhận, vận tải, nhà ga và hãng hàng không cần xác định rõ trách nhiệm, thống nhất cách cập nhật trạng thái lô hàng và đối chiếu thông tin về hàng hóa, chứng từ để kịp thời xử lý vướng mắc trong quá trình chuyển tiếp. Đối với ứng dụng công nghệ thông tin và trao đổi dữ liệu (β = 0,109), Nhà nước và doanh nghiệp cần cùng xây dựng hệ thống thông tin cộng đồng hàng hóa tại cảng hàng không, mở rộng vận đơn điện tử và chia sẻ dữ liệu theo thời gian thực. Đối với mức độ thuận lợi của thủ tục hải quan và giao nhận (β = 0,094), doanh nghiệp giao nhận cần chuẩn bị, chuyển giao chứng từ đầy đủ, kịp thời; cơ quan hải quan giải quyết thủ tục trong phạm vi thẩm quyền.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. Heinitz, M. Hirschberger, C. Werstat. The role of road transport in scheduled air cargo networks. Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol. 104, pp. 1198-1207, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.216.

[2] A. Bombelli, S. Fazi. The ground handler dock capacitated pickup and delivery problem with time windows: A collaborative framework for air cargo operations. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 159, article no. 102603, 2022, doi: 10.1016/j.tre.2022.102603.

[3] I. Jurgelāne-Kaldava, W. V. Effenberger, A. Batenko, K. Čižiūnienė. Digitalization of air cargo supply chains: A case study of Latvia. Systems, vol. 13, no. 6, article no. 468, 2025, doi: 10.3390/systems13060468.

[4] World Bank. Vietnam Development Report 2019: Connecting Vietnam for Growth and Shared Prosperity. World Bank, Washington, DC, 2019.

[5] Y. Y. Lam, K. Sriram, N. Khera. Strengthening Vietnam's Trucking Sector: Towards Lower Logistics Costs and Greenhouse Gas Emissions. Vietnam Transport Knowledge Series, World Bank, Washington, DC, 2019.

[6] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 648/QĐ-TTg ngày 07/6/2023 phê duyệt Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng hàng không, sân bay toàn quốc thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, Hà Nội, 2023.

[7] T. Boonekamp, G. Burghouwt. Measuring connectivity in the air freight industry. Journal of Air Transport Management, vol. 61, pp. 81-94, 2017, doi: 10.1016/j.jairtraman.2016.05.003.

[8] M. Ghosh, T. H. Aktas, C. Amrit, A. Kuiper, G. van Capelleveen, D. de-Jongh. Modeling truck congestion in landside air cargo processes. IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 72, pp. 2861-2882, 2025, doi: 10.1109/TEM.2025.3581853.

[9] J. Ou, V. N. Hsu, C.-L. Li. Scheduling truck arrivals at an air cargo terminal. Production and Operations Management, vol. 19, no. 1, pp. 83-97, 2010, doi: 10.1111/j.1937-5956.2009.01068.x.

[10] A. Beifert. Air cargo development in the regional airports of the Baltic Sea region through road feeder services. Transport and Telecommunication Journal, vol. 16, no. 2, pp. 107-116, 2015, doi: 10.1515/ttj-2015-0010.

[11] S. Djankov, C. Freund, C. S. Pham. Trading on time. The Review of Economics and Statistics, vol. 92, no. 1, pp. 166-173, 2010, doi: 10.1162/rest.2009.11498.

[12] C. Volpe Martincus, J. Carballo, A. Graziano. Customs. Journal of International Economics, vol. 96, no. 1, pp. 119-137, 2015, doi: 10.1016/j.jinteco.2015.01.011.

[13] Quốc hội. Luật Hải quan số 54/2014/QH13 ngày 23/6/2014, Hà Nội, 2014.

[14] B. Feng, Y. Li, Z.-J. M. Shen. Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 56, pp. 263-280, 2015, doi: 10.1016/j.trc.2015.03.028.

[15] World Bank. Air Cargo Digitalization: From EDI to Community Systems. Port Community Systems, World Bank, Washington, DC, 2024.

[16] T. Suwanwong, A. Sopadang, S. Hanaoka, T. Rodbundith. Evaluation of air cargo connectivity and policy in Thailand. Transport Policy, vol. 72, pp. 24-33, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2018.09.005.

[17] L. J. Cronbach. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika, vol. 16, no. 3, pp. 297-334, 1951, doi: 10.1007/BF02310555.

[18] J. C. Nunnally, I. H. Bernstein. Psychometric Theory, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1994.

[19] H. F. Kaiser. A second generation little jiffy. Psychometrika, vol. 35, no. 4, pp. 401-415, 1970, doi: 10.1007/BF02291817.

[20] M. S. Bartlett. Tests of significance in factor analysis. British Journal of Statistical Psychology, vol. 3, no. 2, pp. 77-85, 1950, doi: 10.1111/j.2044-8317.1950.tb00285.x.

■ Ngày nộp bài: 05/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2026

Ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình: Nghiên cứu điển hình tại Công ty Cổ phần Chương Dương

The impact of risks on construction cost escalation: A case study of Chuong Duong Joint Stock Company

> CN NGÔ MINH HIẾU[1], TS LÊ TRỌNG TÙNG[2,*]
[1]Công ty Cổ phần Chương Dương
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: tunglt_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Vượt chi phí là một trong những thách thức phổ biến nhất của ngành Xây dựng trên phạm vi toàn cầu, đặc biệt là tại các quốc gia đang phát triển. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu nhận diện và xếp hạng các nguyên nhân gây vượt chi phí, nhưng còn thiếu những nghiên cứu lượng hóa riêng mức độ ảnh hưởng của từng nhóm rủi ro trong phạm vi một doanh nghiệp xây dựng cụ thể. Nghiên cứu này nhằm xác định và đo lường mức độ ảnh hưởng của các nhóm rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình tại Công ty Cổ phần Chương Dương. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, trong 7 nhóm rủi ro có liên quan thì rủi ro về vật tư và thiết bị có tác động lớn nhất đến sự biến động tăng chi phí thi công; điều này phản ánh vai trò chi phối của biến động giá, nguồn cung và chất lượng vật tư, thiết bị đối với hiệu quả quản lý chi phí thi công công trình. Kết quả nghiên cứu cung cấp luận cứ khoa học và thực tiễn để doanh nghiệp xây dựng chiến lược kiểm soát chi phí, trong đó ưu tiên quản trị nhóm rủi ro vật tư và thiết bị.

Từ khóa: Rủi ro; chi phí thi công công trình; mô hình ảnh hưởng; Công ty Cổ phần Chương Dương.

ABSTRACT

Cost overrun is one of the most pervasive challenges facing the construction industry worldwide, particularly in developing countries. Although numerous studies have identified and ranked the causes of cost overruns, there remains a lack of research that separately quantifies the degree of influence of individual risk groups within a specific construction enterprise. This study aims to identify and measure the extent to which different risk groups affect construction cost escalation at Chuong Duong Joint Stock Company. The findings indicate that, among the seven relevant risk groups, risks related to materials and equipment exert the greatest impact on construction cost escalation; this reflects the dominant role of price volatility, supply availability and the quality of materials and equipment in the effectiveness of construction cost management. The results provide both a scientific and practical basis for the enterprise to develop cost-control strategies, with priority given to managing the materials and equipment risk group.

Keywords: Risk; construction cost; influence model; Chuong Duong Joint Stock Company.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

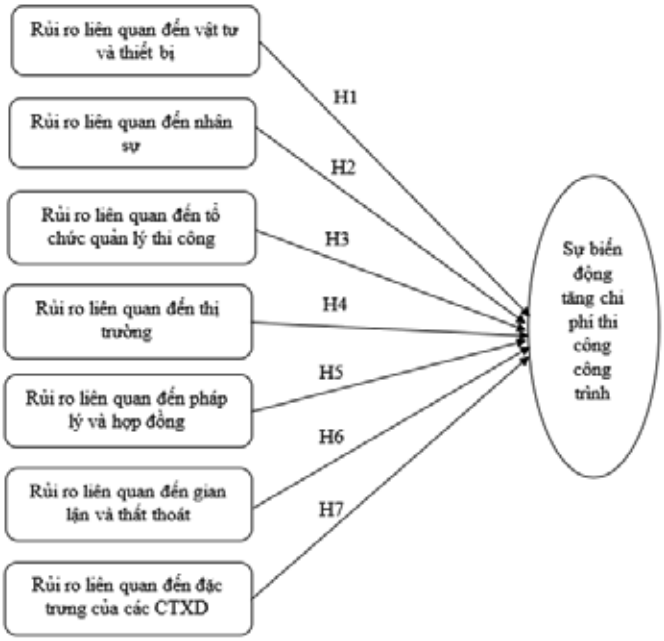
Vượt chi phí thi công công trình được xem là một trong những vấn đề cố hữu và nghiêm trọng của ngành Xây dựng trên toàn thế giới. Nó không chỉ làm suy giảm hiệu quả đầu tư của dự án xây dựng mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến lợi nhuận, uy tín và năng lực cạnh tranh của các doanh nghiệp thi công. Nhiều nguyên nhân vượt chi phí đã được các chuyên gia và các nhà khoa học chỉ ra, nhưng tại Việt Nam chưa có nghiên cứu nào tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của các rủi ro trong phạm vi của một doanh nghiệp xây dựng cụ thể. Trong giới hạn của nghiên cứu, bài báo tập trung vào việc nhận diện và đo lường mức độ ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình tại Công ty cổ phần Chương Dương. Trên cơ sở tổng quan các công trình khoa học có liên quan và thực trạng quản lý chi phí thi công tại Công ty, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình và các giả thuyết nghiên cứu. Từ số liệu khảo sát các chuyên gia là những người đang trực tiếp quản lý và triển khai

thi công các công trình tại Công ty cổ phần Chương Dương, kết hợp với các kỹ thuật phân tích định lượng thông qua phần mềm SPSS, bài báo làm rõ mức độ ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học và thực tiễn để đề xuất các chiến lược và giải pháp nhằm quản trị các rủi ro và kiểm soát chi phí thi công công trình trong phạm vi doanh nghiệp xây dựng.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng mô hình nghiên cứu

Nguyên nhân gây vượt chi phí thi công công trình rất đa dạng và mang tính hệ thống. Nhiều nghiên cứu đã nhận diện và phân loại chúng thành các nhóm nhằm thuận tiện cho việc phân tích, đánh giá và quản lý [1, 2, 3, 4]. Trên cơ sở tổng quan các tài liệu có liên quan và thực trạng quản lý chi phí thi công công trình tại Công ty cổ phần Chương Dương, nhóm tác giả đã hệ thống hóa các rủi ro phổ biến ảnh hưởng đến chi phi thi công thành 7 nhóm bao gồm: (1) Rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị (VT); (2) Rủi ro liên quan đến nhân sự (NS); (3) Rủi ro liên quan đến tổ chức quản lý thi công (TC); (4) Rủi ro liên quan đến thị trường (TT); (5) Rủi ro liên quan đến pháp lý và hợp đồng (PL); (6) Rủi ro liên quan đến gian lận và thất thoát (GL); (7) Rủi ro liên quan đến đặc trưng của các công trình xây dựng (CT). Bảy nhóm rủi ro này sẽ đóng vai trò là biến độc lập trong mô hình nghiên cứu đề xuất. Bên cạnh đó, sự biến động tăng chi phí thi công công trình (CP) là biến phụ thuộc trong mô hình (Hình 1).



Hình 1. Mô hình và các giả thuyết nghiên cứu

2.2. Thu thập dữ liệu

Dữ liệu sử dụng để phân tích định lượng được thu thập thông qua việc khảo sát các chuyên gia là những người đang trực tiếp tham gia hoạt động quản lý và triển khai thi công các công trình tại Công ty cổ phần Chương Dương.

Số lượng mẫu khảo sát tối thiểu được tính toán theo đề xuất của Tabachnick và Fidell [5], theo đó để tiến hành phân tích hồi quy tốt nhất thì kích thước mẫu n ≥ 50 + 8.m (m là số biến độc lập trong mô hình). Trong mô hình nghiên cứu đề xuất có 7 biến độc lập, nên cỡ mẫu tối thiểu là: 50 + (8 x 7) = 106.

Mẫu khảo sát các thông tin cho các biến trong mô hình nghiên cứu (Hình 1) được thiết kế bao gồm: 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị - VT"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến nhân sự - NS"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến tổ chức quản lý thi công - TC"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến thị trường - TT"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến pháp lý và hợp đồng - PL"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến gian lận và thất thoát - GL"; 5 nội dung khảo sát cho biến "Rủi ro liên quan đến đặc trưng của các công trình xây dựng - CT" và 3 nội dung khảo sát cho biến phụ thuộc "Sự biến động tăng chi phí thi công công trình - CP". Tổng cộng có 38 nội dung khảo sát cho tất cả các biến trong mô hình nghiên cứu. Nội dung khảo sát và phương án đánh giá được thiết kế dựa trên thang đo "Likert" 5 mức độ. Với mỗi nội dung khảo sát, đối tượng được khảo sát sẽ dựa vào thực tế trải nghiệm của mình để đánh giá và lựa chọn phương án trả lời theo 5 mức độ khác nhau, bao gồm: (1) Rất không đồng ý; (2) không đồng ý; (3) trung lập; (4) đồng ý; (5) rất đồng ý.

Tất cả có 150 mẫu khảo sát thu được từ các đối tượng khảo sát thông qua phương tiện thư điện tử, trong đó có 142 mẫu khảo sát đáp ứng các thông tin yêu cầu khảo sát và đủ điều kiện để đưa vào các bước phân tích tiếp theo.

2.3. Phương pháp và công cụ phân tích dữ liệu

Các số liệu khảo sát sau khi thu thập được, nhóm tác giả tiến hành làm sạch dữ liệu, lọc bảng câu hỏi, mã hóa các thông tin cần thiết, nhập dữ liệu và phân tích bằng phần mềm SPSS Statistics 27. Dữ liệu sẽ được phân tích thông qua các kỹ thuật phân tích định lượng gồm: Thống kê mô tả; đánh giá độ tin cậy của thang đo; phân tích phương sai; phân tích tương quan; phân tích hồi quy và kiểm định mô hình.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÌNH LUẬN

3.1. Phân tích thống kê mô tả

Phương pháp thống kê mô tả được nhóm tác giả sử dụng nhằm sàng lọc các thông tin liên quan đến đối tượng khảo sát thu thập được. Kết quả phân tích thống kê mô tả liên quan đến các mẫu khảo sát được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Mô tả mẫu nghiên cứu

Thông tin khảo sát		Số lượng	Tỷ lệ (%)
Số năm kinh ghiệm của chuyên gia	1 - 5 năm	19	13,4
	6 - 10 năm	54	38
	11 - 15 năm	55	38,7
	> 15 năm	14	9,9

3.2. Phân tích độ tin cậy của thang đo

Độ tin cậy của thang đo được đánh giá thông qua hệ số Cronbach's Alpha. Phạm vi giá trị Cronbach's Alpha là từ 0 đến 1. Giá trị Cronbach's alpha càng cao thì thang đo càng đáng tin cậy và ở mức lớn hơn 0,7 được coi là tốt và chấp nhận được khi kiểm tra độ tin cậy của thang đo [6].

Dữ liệu thu thập từ 142 mẫu quan sát được tổng hợp và kiểm tra độ tin cậy cho 7 biến độc lập và 1 biến phụ thuộc trong mô hình nghiên cứu. Kết quả giá trị của Cronbach's alpha của 7 biến độc lập lần lượt là 0,841; 0,845; 0,867; 0,825; 0,866; 0,869; 0,863 và của 1 biến phụ thuộc là 0,892. Hệ số tương quan biến tổng của 38 biến quan sát nằm trong khoảng từ 0,614 đến 0,813 > 0,3. Như vậy, thang đo của tất cả các biến trong mô hình là rất tốt và đảm bảo độ tin cậy cho các bước phân tích tiếp theo.

3.3. Phân tích phương sai (ANOVA)

Mục đích của phân tích ANOVA trong nghiên cứu này nhằm kiểm tra có sự khác biệt hay không giữa số năm kinh nghiệm của các chuyên gia khi đánh giá ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình.

Bảng 2. Kiểm tra tính đồng nhất của các phương sai

Tests of Homogeneity of Variances					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
CP	Based on Mean	0,358	3	138	0,783

Bảng 3. Kết quả kiểm định ANOVA

ANOVA					
CP					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0,911	3	0,304	0,291	0,832

Từ kết quả kiểm tra tính đồng nhất của các phương sai (Bảng 2) ta thấy mức ý nghĩa Sig. của Levene là 0,783 > 0,05, đồng thời mức ý nghĩa Sig. của kiểm định ANOVA là 0,832 > 0,05 (Bảng 3), chứng tỏ không có sự khác biệt về giá trị trung bình; nghĩa là không có sự khác biệt giữa số năm kinh nghiệm của các chuyên gia khi đánh giá ảnh hưởng của các rủi ro đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình. Sự thống nhất này về mặt kỹ thuật sẽ là hợp lý khi sử dụng tổ hợp mẫu từ các đối tượng khảo sát với số năm kinh nghiệm khác nhau để tiến hành các bước phân tích tiếp theo.

3.4. Phân tích tương quan giữa các biến độc lập

Trước khi phân tích hồi quy, nhóm tác giả tiến hành kiểm tra mối liên hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập thông qua hệ số tương quan Pearson (r), vì điều kiện để hồi quy trước hết là phải tương qua.

Bảng 4. Phân tích tương quan

Correlations									
		CP	VT	NS	TC	TT	PL	GL	CT
CP	Pearson Correlation	1	0,628**	0,460**	0,487**	0,501**	0,403**	0,442**	0,492**
	Sig. (2-tailed)		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	142	142	142	142	142	142	142	142
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).									
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).									

Kết quả phân tích tương quan ở Bảng 4 cho thấy: Tất cả các mức ý nghĩa Sig. < 0,05 và các hệ số tương quan (r) dao động trong khoảng từ 0,403 đến 0,628 (thỏa mãn điều kiện -1 ≤ r ≤ + 1). Như vậy, cả 7 biến độc lập có mối quan hệ tuyến tính rất chặt chẽ với biến phụ thuộc.

3.5. Phân tích hồi quy tuyến tính và kiểm kịnh mô hình

3.5.1. Phân tích hồi quy tuyến tính

Mục đích của phân tích hồi quy tuyến tính là ước lượng mức độ tương quan giữa biến phụ thuộc và các biến độc lập. Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính được thể hiện từ Bảng 5 đến Bảng 7 dưới đây:

Bảng 5. Kết quả kiểm định R^2 và Durbin - Watson

Model Summary[b]					
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0,811[a]	0,658	**0,640**	0,60810	1,909
a. Predictors: (Constant), CT, PL, NS, TT, GL, VT, TC					
b. Dependent Variable: CP					

Bảng 6. Kết quả kiểm định ANOVA

ANOVA[a]						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	95,349	7	13,621	36,836	**0,000[b]**
	Residual	49,551	134	0,370		
	Total	144,899	141			
a. Dependent Variable: CP						
b. Predictors: (Constant), CT, PL, NS, TT, GL, VT, TC						

Bảng 7. Tổng hợp kết quả phân tích hồi quy

Coefficients[a]								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	**-3,355**	0,443		-7,572	0,000		
	VT	**0,584**	0,094	**0,363**	6,217	0,000	0,747	1,338
	NS	**0,219**	0,090	**0,141**	2,438	0,016	0,758	1,320
	TC	**0,228**	0,089	**0,151**	2,550	0,012	0,725	1,379
	TT	**0,176**	0,089	**0,119**	1,966	**0,051**	0,695	1,439
	PL	**0,206**	0,083	**0,137**	2,484	0,014	0,838	1,193
	GL	**0,181**	0,082	**0,126**	2,206	0,029	0,783	1,278
	CT	**0,359**	0,081	**0,245**	4,411	0,000	0,826	1,211
a. Dependent Variable: CP								

- Từ kết quả phân tích hồi quy tuyến tính nêu trên, ta có:

+ Giá trị hệ số R^2 hiệu chỉnh là 0,640 (Bảng 5), như vậy các biến độc lập giải thích được 64% sự biến thiên của biến phụ thuộc.

+ Giá trị Sig của F là 0,000 < 0,01 (Bảng 6), đảm bảo mô hình hồi quy tuyến tính có ý nghĩa thống kê với độ tin cậy trên 99% và chứng tỏ mô hình phù hợp với dữ liệu thực tế và đảm bảo độ tin cậy.

+ Giá trị hệ số phóng đại phương sai VIF (Bảng 7) của các biến độc lập từ 1,193 đến 1,439 (nhỏ hơn 10) cho thấy không có hiện tượng đa cộng tuyến trong dữ liệu.

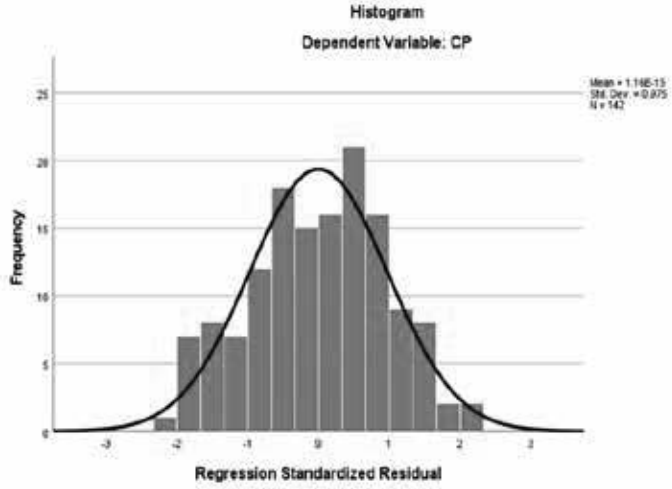
+ Hệ số hồi quy (B) của cả 7 biến độc lập (VT, NS, TC, TT, PL, GL và CT) đều lớn hơn 0 (Bảng 7), chứng tỏ cả 7 biến độc lập đều có mối quan hệ thuận chiều với biến phụ thuộc. Trong đó, biến "Rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị - VT" có hệ số hồi quy Beta chuẩn hoá lớn nhất (0,363), chứng tỏ biến VT đóng vai trò ảnh hưởng quan trọng nhất đối với sự biến động tăng chi phí thi công công trình (CP). Tuy nhiên, biến "Rủi ro liên quan đến thị trường - TT" không có ý nghĩa thống kê trong mô hình, vì theo kết quả kiểm định t (Bảng 7), mức ý nghĩa Sig. của biến TT là 0,051 > 0,05. Điều này có thể là do biến "Rủi ro liên quan đến thị trường - TT" có những mối liên hệ với biến "Rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị - VT", khi đó hồi quy bội sẽ gán phần phương sai chung cho biến có quan hệ chặt hơn với biến phụ thuộc (ở đây là biến rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị), khiến hệ số của nhóm rủi ro liên quan đến thị trường mất ý nghĩa dù ảnh hưởng thực tế vẫn tồn tại.

3.5.2. Kiểm định mô hình hồi quy

3.5.2.1. Kiểm định sự phù hợp của mô hình tiên lượng

* Kiểm định phân phối chuẩn dao động dư:

Giả định đầu tiên trong phân tích hồi quy đó là phần dư trong hồi quy phải xấp xỉ phân phối chuẩn.

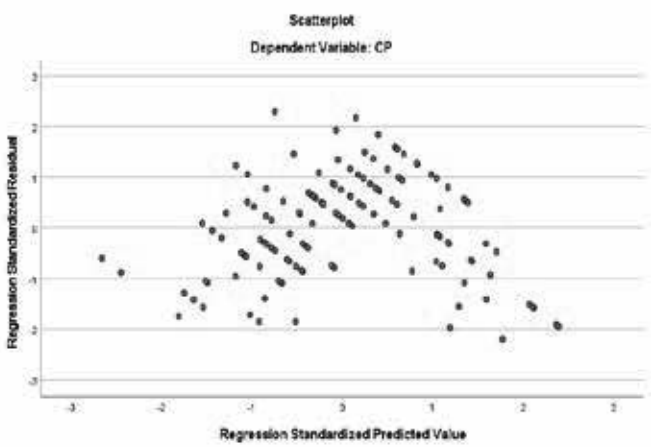


Hình 2. Biểu đồ phân phối dao động dư Histogram

Từ biểu đồ phân phối dao động dư (Hình 2) ta thấy: Đường cong phân phối chuẩn được đặt chồng lên gần trùng với biên độ của biểu đồ tần số. Đường cong này có dạng hình chuông, phù hợp với dạng đồ thị của phân phối chuẩn. Giá trị trung bình (Mean = 1.16E - 15) gần bằng 0, độ lệch chuẩn là 0,975 gần bằng 1. Như vậy, phân phối phần dao động dư của mô hình tiên lượng xấp xỉ chuẩn, giả định phân phối chuẩn của phần dư không bị vi phạm.

3.5.2.2. Kiểm định mối quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc và biến độc lập

Giả định thứ 2 trong phân tích hồi quy đó là phải có mối quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập. Biểu đồ phân tán Scatter Plot giữa các phần dư chuẩn hóa và giá trị dự đoán chuẩn hóa sẽ giúp ta tìm xem dữ liệu hiện tại có vi phạm giả định quan hệ tuyến tính hay không.



Hình 3. Biểu đồ phân tán Scatter Plot

Với biểu đồ Scatter Plot (Hình 3), ta nhận thấy rằng các điểm phân bố của phần dư có dạng đường thẳng và dao động xung quanh đường tung độ 0. Như vậy, giả định quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập không bị vi phạm.

4. KẾT LUẬN

Thông qua việc phân tích định lượng mô hình mối quan hệ giữa các rủi ro và sự biến động tăng chi phí thi công công trình tại Công ty Cổ phần Chương Dương, bài báo đã chỉ ra 6 nhóm rủi ro: Rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị (VT); Rủi ro liên quan đến nhân sự (NS); Rủi ro liên quan đến tổ chức quản lý thi công; Rủi ro liên quan đến pháp lý và hợp đồng; Rủi ro liên quan đến gian lận và thất thoát (GL); Rủi ro liên quan đến đặc trưng của các công trình xây dựng (CT) có mối quan hệ thuận chiều và ảnh hưởng đến sự biến động tăng chi phí thi công công trình. Trong đó, rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị (VT) đóng vai trò ảnh hưởng quan trọng nhất. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học và thực tiễn để doanh nghiệp xây dựng đề ra chiến lược kiểm soát chi phí thi công, trong đó ưu tiên các giải pháp nhằm quản trị nhóm rủi ro liên quan đến vật tư và thiết bị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Doloi, H. Cost overruns and failure in project management: Understanding the roles of key stakeholders in construction projects. Journal of Construction Engineering and Management, 139(3), 267-279, 2013.

[2] Larsen, J. K., Shen, G. Q., Lindhard, S. M., & Brunoe, T. D. Factors affecting schedule delay, cost overrun and quality level in public construction projects. Journal of Management in Engineering, 32(1), 04015032, 2016.

[3] Le-Hoai, L., Lee, Y. D., & Lee, J. Y. Delay and cost overruns in Vietnam large construction projects: A comparison with other selected countries. KSCE Journal of Civil Engineering, 12(6), 367-377, 2008.

[4] Huynh, N. M., Le, A. T., Le-Hoai, L., & Nguyen, H. T. Factors causing cost overruns in public hospital construction in developing countries: A case from Vietnam. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 24(3), 1716-1730, 2024.

[5] Tabachnick B. G. và Fidell L. S. Using Multivariate Statistics, 3rd Edition, New York: Harper Collins, 1996.

[6] Hair J.F., Anderson R.E., Tatham R.L., Black W.C. Multivariate Data Analysis, 5th Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

■ Ngày nộp bài: 10/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 19/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 04/11/2026

Các nhóm yếu tố liên quan đến công tác kiểm soát chất lượng thi công nhà ở cao tầng: Khảo sát chuyên gia và đề xuất thứ tự ưu tiên giải pháp

Factors associated with construction quality control in high-rise residential projects: An expert survey and prioritized improvement measures

> HỒ KHẮC QUANG[1,*], THS NGUYỄN THẾ PHONG[2], THS NGUYỄN ĐỨC THUẬN[3]
[1]HVCH ngành Quản lý xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
[2]UBND xã Đại Phước, TP Đồng Nai
[3]Sở Xây dựng TP Đồng Nai
[*]Email: 2480302066@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Kiểm soát chất lượng trong giai đoạn thi công ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn, độ bền và chi phí vòng đời của công trình nhà ở cao tầng. Nghiên cứu kết hợp hai nguồn dữ liệu: Hồ sơ, quy trình quản lý chất lượng của một dự án nhà ở bốn tháp tại TP.HCM và ý kiến của 117 chuyên gia thuộc chủ đầu tư, nhà thầu và tư vấn giám sát. Thang đo gồm 24 biến thuộc 6 nhóm yếu tố, đạt độ tin cậy với Cronbach's Alpha từ 0,815 đến 0,887 và KMO = 0,913. Mô hình hồi quy tuyến tính bội giải thích 66,3% biến thiên của công tác kiểm soát chất lượng thi công; chỉ hai nhóm có ý nghĩa thống kê là kiểm soát khiếm khuyết, bảo hành (β = 0,343) và vật liệu, thiết bị đầu vào (β = 0,314). Đáng chú ý, nhóm kiểm soát khiếm khuyết được xếp hạng quan trọng thấp nhất nhưng có mối liên hệ mạnh nhất. Kết hợp kết quả định lượng với các tồn tại tại dự án, nghiên cứu đề xuất thứ tự ưu tiên triển khai 6 nhóm giải pháp, trong đó ưu tiên thứ nhất là quản lý khiếm khuyết theo nguyên nhân gốc.

Từ khóa: Kiểm soát chất lượng thi công; nhà ở cao tầng; khiếm khuyết; phân tích nhân tố; hồi quy tuyến tính.

ABSTRACT

Quality control during construction directly determines the safety, durability and life-cycle cost of high-rise residential buildings. This study combines an analysis of the quality management procedures of a four-tower residential project in Ho Chi Minh City with a survey of 117 practitioners from owners, contractors and supervision consultants. The 24-item scale covering six factor groups was reliable (Cronbach's alpha 0.815–0.887; KMO = 0.913). A multiple linear regression model explained 66.3% of the variance in construction-stage quality control; only defect control and warranty (β = 0.343) and incoming materials and equipment (β = 0.314) were significant. Notably, defect control was ranked least important but showed the strongest association. Combining these results with deficiencies observed at the project, the study proposes an implementation priority order for six groups of measures, led by root-cause-based defect management.

Keywords: Construction quality control; high-rise residential building; defects; factor analysis; linear regression.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhà ở cao tầng có mật độ công việc bị che khuất cao, nhiều bộ môn giao cắt và thời gian bàn giao kéo dài theo từng tháp. Trong điều kiện đó, một sai sót không được phát hiện ở công đoạn trước thường chỉ lộ ra khi đã hoàn thiện hoặc sau khi bàn giao căn hộ, lúc chi phí khắc phục đã tăng nhiều lần. Các nghiên cứu về hiện tượng làm lại cho thấy phần lớn chi phí này bắt nguồn từ sai sót có thể phòng ngừa được trong quá trình thi công [1].

Tại Việt Nam, Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 và Nghị định số 207/2026/NĐ-CP về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình đều áp dụng từ tháng 7/2026 [2, 3]. Tuy vậy, câu hỏi thực tiễn đối với người quản lý dự án vẫn là: Trong nguồn lực có hạn, nên ưu tiên cải thiện khâu nào trước?

Các nghiên cứu trong nước về quản lý chất lượng công trình thường đi theo hai hướng tách rời: Phân tích định tính thực trạng tại một dự án cụ thể hoặc khảo sát định lượng các yếu tố ảnh hưởng ở phạm vi chung. Bài báo kết hợp hai hướng đó với 3 mục tiêu: (i) Lượng hóa, theo ý kiến chuyên gia, mức độ quan trọng của từng nhóm yếu tố và mức độ liên hệ của chúng với công tác kiểm soát chất lượng trong thi công; (ii) đối chiếu kết quả với các tồn tại quan sát được tại một dự án nhà ở cao tầng; (iii) đề xuất thứ tự ưu tiên triển khai giải pháp.

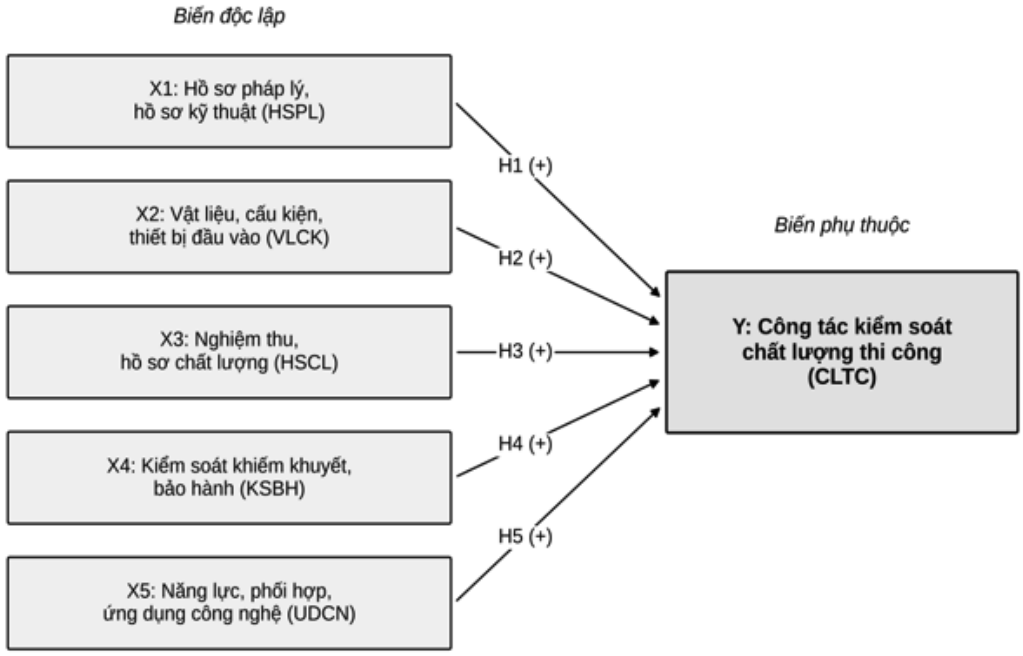
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

Theo cách tiếp cận quản lý chất lượng toàn diện, chất lượng công trình là kết quả của cả chuỗi hoạt động từ chuẩn bị, thi công đến bàn giao, trong đó cam kết của lãnh đạo, đào tạo và phối hợp giữa các bên giữ vai trò then chốt [4]. Khảo sát của Jha và Iyer cho thấy năng lực nhà quản lý, việc theo dõi, giám sát và sự phối hợp giữa các bên là các yếu tố nổi trội tác động đến kết quả chất lượng của dự án [5]. Tiêu chuẩn ISO 9001:2015 nhấn mạnh tiếp cận theo quá trình, chu trình PDCA và yêu cầu xác định nguyên nhân, xem xét hiệu lực của hành động khắc phục khi xảy ra sự không phù hợp [6]; song kinh nghiệm áp dụng cho nhà thầu cho thấy hệ thống chỉ có tác dụng khi các yêu cầu được cụ thể hóa thành thủ tục làm việc tại hiện trường [7].

2.2. Mô hình và giả thuyết nghiên cứu

Trên cơ sở đó, công tác quản lý chất lượng thi công được xem như một chuỗi kiểm soát liên tục gồm 6 nhóm nội dung (Bảng 1). Vì đối tượng quan tâm là hoạt động kiểm tra, giám sát diễn ra hằng ngày trên công trường, nhóm kiểm soát trong thi công (CLTC) được dùng làm biến phụ thuộc Y; 5 nhóm còn lại là biến độc lập X1 - X5 (Hình 1). Các giả thuyết H1 - H5 phát biểu rằng đánh giá về mỗi nhóm HSPL, VLCK, HSCL, KSBH, UDCN có mối liên hệ cùng chiều với đánh giá về CLTC.



X1 - X5: Biến độc lập; Y: Biến phụ thuộc; H1 - H5: Giả thuyết về mối liên hệ cùng chiều

Hình 1. Mô hình nghiên cứu

Bảng 1. Các nhóm yếu tố và biến quan sát

Nhóm (mã)	Nội dung chính của các biến quan sát	Số biến
Hồ sơ pháp lý, hồ sơ kỹ thuật (HSPL)	Sự đầy đủ, thống nhất của hồ sơ; tính rõ ràng của thiết kế, chỉ dẫn kỹ thuật; cập nhật kịp thời; kiểm soát phiên bản	4
Vật liệu, cấu kiện, thiết bị đầu vào (VLCK)	Sự phù hợp của vật liệu; hồ sơ nguồn gốc, chứng nhận; kiểm tra, thí nghiệm đầu vào; bảo quản, vận chuyển	4
Kiểm soát trong thi công (CLTC)	Tuân thủ biện pháp thi công; giám sát từng công việc; kiểm soát công việc đặc biệt; phát hiện, xử lý sai sót	4
Nghiệm thu, hồ sơ chất lượng (HSCL)	Điều kiện nghiệm thu; tính kịp thời, chặt chẽ; hồ sơ chất lượng, hoàn công; lưu trữ	4
Kiểm soát khiếm khuyết, bảo hành (KSBH)	Nhận diện kịp thời khiếm khuyết; hiệu quả khắc phục; theo dõi khắc phục và bảo hành	3
Năng lực, phối hợp, ứng dụng công nghệ (UDCN)	Năng lực đội ngũ; ý thức tuân thủ; phối hợp, trao đổi thông tin; xử lý thống nhất vấn đề kỹ thuật; công nghệ số	5

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Trường hợp nghiên cứu

Trường hợp nghiên cứu là một dự án nhà ở cao tầng cấp I tại TP.HCM, gồm bốn tháp cao 26 và 38 tầng trên khối đế và hai tầng hầm, tổng diện tích sàn khoảng 137.000 m^2, 1.296 căn hộ. Các quy trình quản lý chất lượng được phân tích qua 3 nhóm tài liệu: Kế hoạch chất lượng của nhà thầu, hệ thống văn bản ISO của đơn vị tư vấn và bảng phân công trách nhiệm cho 91 đầu việc.

2.3.2. Thu thập dữ liệu

Mỗi biến được đánh giá theo thang Likert 5 mức về mức độ ảnh hưởng, từ 1 - ảnh hưởng rất ít đến 5 - ảnh hưởng rất lớn. Phiếu được gửi trực tuyến đến cán bộ, kỹ sư có tối thiểu ba năm kinh nghiệm theo phương pháp chọn mẫu thuận tiện. Trong 141 phiếu phản hồi, 1 phiếu thiếu dữ liệu và 23 phiếu chọn cùng một mức cho cả 24 biến bị loại do không thể hiện sự phân biệt giữa các yếu tố; mẫu phân tích còn 117 phiếu.

2.3.3. Phương pháp phân tích

Dữ liệu được phân tích trên SPSS: Thống kê mô tả và xếp hạng; đánh giá độ tin cậy bằng Cronbach's Alpha (≥ 0,6; tương quan biến - tổng ≥ 0,3) [8]; phân tích nhân tố khám phá (KMO ≥ 0,5; Bartlett Sig. < 0,05; hệ số tải ≥ 0,5; phương sai trích ≥ 50%) [9, 10]; so sánh giữa 3 nhóm chủ thể bằng ANOVA, Kruskal-Wallis và tương quan hạng Spearman; tương quan Pearson và hồi quy tuyến tính bội (VIF < 10; Durbin-Watson từ 1,5 đến 2,5). Biến phụ thuộc Y là giá trị trung bình của 4 biến CLTC. Kết quả hồi quy được diễn giải là mối liên hệ trong nhận thức của chuyên gia, không phải quan hệ nhân quả. Cỡ mẫu 117 vượt ngưỡng tối thiểu 100 quan sát [9] và đủ cho phân tích nhân tố khi hệ số communality cao [11].

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Đặc điểm mẫu khảo sát

Người trả lời thuộc nhà thầu chiếm 44,4%, chủ đầu tư hoặc ban quản lý dự án 39,3%, tư vấn giám sát 11,1%, phần còn lại (5,2%) thuộc cơ quan chuyên ngành và tư vấn thiết kế. Có 87,2% người trả lời có từ 5 năm kinh nghiệm trở lên; phần lớn tham gia công trình dân dụng (87,2%), công trình cấp I trở lên (65,8%) và dự án trên 500 tỷ đồng (70,9%).

3.2. Xếp hạng mức độ quan trọng và độ tin cậy của thang đo

Cả 24 biến có giá trị trung bình từ 3,77 đến 4,32 (trung bình chung 4,02), tức đều ở mức ảnh hưởng lớn trở lên; độ lệch chuẩn đều nhỏ hơn 1. Xếp hạng theo nhóm yếu tố cho thấy hồ sơ pháp lý, kỹ thuật được đánh giá quan trọng nhất và kiểm soát khiếm khuyết, bảo hành thấp nhất (Bảng 2). Cronbach's Alpha của 6 nhóm từ 0,815 đến 0,887; tương quan biến - tổng thấp nhất là 0,524, nên toàn bộ 24 biến được giữ lại.

Bảng 2. Xếp hạng mức độ quan trọng và độ tin cậy theo nhóm yếu tố (n = 117)

Nhóm yếu tố	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Thứ hạng	Cronbach's Alpha
HSPL	4,17	0,661	1	0,838
CLTC	4,11	0,639	2	0,855
VLCK	3,98	0,650	3	0,831
UDCN	3,98	0,533	3	0,815
HSCL	3,95	0,609	5	0,887
KSBH	3,91	0,707	6	0,886

3.3. Phân tích nhân tố và so sánh giữa các nhóm chủ thể

Hệ số KMO đạt 0,913; kiểm định Bartlett có χ^2 = 1832,744, bậc tự do 276, Sig. = 0,000. Với phép trích thành phần chính và xoay Varimax, dữ liệu hội tụ thành 4 nhân tố (Eigenvalue thấp nhất 1,024), giải thích 64,861% tổng phương sai. Việc các biến CLTC và KSBH gom về cùng một nhân tố gợi ý rằng, trong nhận thức của người làm nghề, kiểm tra trong thi công và xử lý khiếm khuyết là hai nửa của một vòng khép kín. Có 10 biến tải chéo với chênh lệch dưới 0,3; vì mục tiêu đánh giá theo nội dung quản lý, cấu trúc 6 nhóm được giữ lại và hạn chế về giá trị phân biệt được ghi nhận.

Kiểm định ANOVA và Kruskal-Wallis giữa chủ đầu tư (46 người), nhà thầu (52 người) và tư vấn giám sát (13 người) đều cho Sig. > 0,05 ở cả 6 nhóm. Hệ số Spearman so sánh thứ hạng 24 biến giữa từng cặp chủ thể dao động từ 0,450 đến 0,698 và đều có ý nghĩa. Như vậy, các bên có chung nhận thức về thứ tự quan trọng của các yếu tố.

3.4. Tương quan và hồi quy

Cả 5 biến độc lập tương quan cùng chiều với Y ở mức ý nghĩa 1% (r từ 0,581 đến 0,736). Mô hình hồi quy có R^2 hiệu chỉnh = 0,663; F = 46,656 (Sig. = 0,000); Durbin-Watson = 2,062; VIF từ 1,942 đến 2,276; phần dư có phân phối gần chuẩn. Kết quả kiểm định giả thuyết được trình bày tại Bảng 3. Phương trình hồi quy chuẩn hóa với các biến có ý nghĩa được thể hiện ở công thức (1).

$$Y = 0{,}343 \cdot KSBH + 0{,}314 \cdot VLCK \quad (1)$$

Bảng 3. Kết quả hồi quy và kiểm định giả thuyết

Giả thuyết	Hệ số Beta chuẩn hóa	Sig.	Kết luận
H1: HSPL → Y	0,040	0,597	Không chấp nhận
H2: VLCK → Y	0,314	0,000	Chấp nhận
H3: HSCL → Y	0,150	0,064	Không chấp nhận ở mức 5%
H4: KSBH → Y	0,343	0,000	Chấp nhận
H5: UDCN → Y	0,133	0,105	Không chấp nhận

4. CÁC HÀM Ý VÀ ĐỀ XUẤT

4.1. Hàm ý từ kết quả nghiên cứu

Nhóm hồ sơ pháp lý, kỹ thuật được xếp hạng quan trọng nhất nhưng không có ý nghĩa trong hồi quy. Có thể giải thích rằng hồ sơ là điều kiện nền được hầu hết chuyên gia đánh giá cao như nhau, nên ít phân hóa và không giải thích được khác biệt về kiểm soát thi công.

Ngược lại, nhóm kiểm soát khiếm khuyết, bảo hành bị xếp hạng thấp nhất nhưng có mối liên hệ mạnh nhất với Y. Phát hiện này nhất quán với kết quả phân tích nhân tố và với lập luận về chi phí làm lại [1]: Khiếm khuyết chỉ thật sự được kiểm soát khi được ghi nhận, truy nguyên và ngăn lặp lại; nếu khâu này chỉ dừng ở sửa lỗi mà không truy tìm nguyên nhân thì lỗi sẽ lặp lại ở các tầng, các tháp tiếp theo.

4.2. Đối chiếu với tồn tại tại dự án

Cả hai nhóm có ý nghĩa thống kê đều có tồn tại cụ thể tại dự án. Về khiếm khuyết, dự án theo dõi phiếu báo cáo sự không phù hợp (NCR) bằng thời gian đóng chứ không theo dõi lỗi có lặp lại hay không; lỗi phát hiện ở tháp bàn giao trước chưa được tổng hợp để phòng ngừa cho tháp sau, chưa đáp ứng yêu cầu xác định nguyên nhân của ISO 9001 [6]. Về vật liệu, kế hoạch thí nghiệm có tần suất cụ thể mới tập trung vào vật liệu kết cấu, trong khi vật liệu hoàn

thiện, chống thấm và thiết bị cơ điện (nhóm thường phát sinh lỗi khi bàn giao căn hộ) chủ yếu được kiểm soát qua chứng chỉ và mẫu. Ngoài ra, nhân sự QA/QC nằm dưới quyền chỉ huy trưởng, người đồng thời chịu trách nhiệm tiến độ.

4.3. Thứ tự ưu tiên triển khai giải pháp

Cần phân biệt hai khái niệm: Thứ tự xếp hạng nhân tố tại Bảng 2 phản ánh mức độ quan trọng do chuyên gia đánh giá, còn thứ tự ưu tiên tại Bảng 4 là thứ tự triển khai các nhóm giải pháp. Thứ tự ưu tiên giải pháp được xác định theo 3 căn cứ: (i) Mối liên hệ có ý nghĩa thống kê và độ lớn hệ số β; (ii) tồn tại thực tế đã nhận diện tại dự án; (iii) khả năng triển khai sớm với chi phí thấp; hai nhóm đầu chủ yếu là thay đổi quy chế, biểu mẫu và chỉ tiêu. Nhóm được xếp hạng quan trọng cao nhưng không có ý nghĩa hồi quy được xem là điều kiện nền cần duy trì.

Bảng 4. Thứ tự ưu tiên triển khai các nhóm giải pháp

Thứ tự ưu tiên	Nhóm giải pháp	Căn cứ (thứ hạng; β)	Nội dung giải pháp chính
1	Quản lý khiếm khuyết, bảo hành	Hạng 6; β = 0,343	Sổ dữ liệu lỗi thống nhất cho thi công, bàn giao, bảo hành; phân tích nguyên nhân gốc với lỗi lặp lại; chỉ tiêu tỷ lệ lỗi tái diễn, mật độ lỗi trên căn hộ; chuyển bài học từ tháp trước sang tháp sau
2	Kiểm soát vật liệu, thiết bị	Hạng 3; β = 0,314	Bổ sung kế hoạch thí nghiệm cho vật liệu hoàn thiện, chống thấm, cơ điện; kiểm tra kho bãi định kỳ; truy xuất lô vật liệu đến vị trí sử dụng
3	Kiểm soát trong thi công	Hạng 2; biến phụ thuộc	Chuyển tuyến báo cáo QA/QC khỏi chỉ huy trưởng; điểm dừng kiểm tra bắt buộc cho công việc bị che khuất; chỉ tiêu tỷ lệ nghiệm thu đạt lần đầu
4	Hồ sơ pháp lý, kỹ thuật	Hạng 1; β = 0,040	Duy trì như điều kiện nền: Danh mục tài liệu kiểm soát phiên bản; rà soát kế hoạch chất lượng theo khung pháp lý mới
5	Nghiệm thu, hồ sơ chất lượng	Hạng 5; β = 0,150	Tách nghiệm thu chất lượng khỏi xác nhận khối lượng thanh toán; lập hồ sơ cuốn chiếu theo từng tháp
6	Năng lực, phối hợp, công nghệ	Hạng 3; β = 0,133	Thời hạn phản hồi yêu cầu làm rõ thiết kế; đào tạo theo nhóm đối tượng; môi trường dữ liệu chung theo ISO 19650 [12]

5. KẾT LUẬN

Kết quả cho thấy chỉ hai nhóm là kiểm soát khiếm khuyết và vật liệu đầu vào có liên hệ đạt ý nghĩa thống kê với kiểm soát thi công, trong đó khâu khiếm khuyết bị đánh giá thấp so với vai trò thực tế. Vì vậy, giải pháp ưu tiên thứ nhất là chuyển quản lý khiếm khuyết từ đo tốc độ đóng lỗi sang phân tích nguyên nhân gốc và phòng ngừa tái diễn, tiếp theo là mở rộng kiểm soát vật liệu hoàn thiện và thiết bị cơ điện.

Nghiên cứu có 3 hạn chế: Dữ liệu là nhận định của chuyên gia về mức độ quan trọng, không phải số đo kết quả thực hiện tại công trường; biến phụ thuộc thuộc cùng thang đo nên kết quả chỉ thể hiện mối liên hệ; mẫu được chọn thuận tiện. Hướng tiếp theo là đo kết quả chất lượng bằng chỉ tiêu khách quan và mở rộng mẫu sang nhiều dự án.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] P. E. D. Love, Z. Irani, D. J. Edwards. A rework reduction model for construction projects. IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 51, no. 4, pp. 426-440, 2004, doi: 10.1109/TEM.2004.835092.

[2] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15, 2025.

[3] Chính phủ. Nghị định số 207/2026/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Xây dựng về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng, 2026.

[4] D. Arditi, H. M. Günaydın. Total quality management in the construction process. International Journal of Project Management, vol. 15, no. 4, pp. 235-243, 1997, doi: 10.1016/S0263-7863(96)00076-2.

[5] K. N. Jha, K. C. Iyer. Critical factors affecting quality performance in construction projects. Total Quality Management & Business Excellence, vol. 17, no. 9, pp. 1155-1170, 2006, doi: 10.1080/14783360600750444.

[6] International Organization for Standardization. ISO 9001:2015: Quality management systems - Requirements. Geneva: ISO, 2015.

[7] A. A. Bubshait, T. H. Al-Atiq. ISO 9000 quality standards in construction. Journal of Management in Engineering, vol. 15, no. 6, pp. 41-46, 1999, doi: 10.1061/(ASCE)0742-597X(1999)15:6(41).

[8] J. C. Nunnally, I. H. Bernstein. Psychometric Theory. 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1994.

[9] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, R. E. Anderson. Multivariate Data Analysis. 7th ed., Pearson, Upper Saddle River, NJ, 2010.

[10] H. F. Kaiser. An index of factorial simplicity. Psychometrika, vol. 39, no. 1, pp. 31-36, 1974, doi: 10.1007/BF02291575.

[11] R. C. MacCallum, K. F. Widaman, S. Zhang, S. Hong. Sample size in factor analysis. Psychological Methods, vol. 4, no. 1, pp. 84-99, 1999, doi: 10.1037/1082-989X.4.1.84.

[12] International Organization for Standardization. ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles. Geneva: ISO, 2018.

■ Ngày nộp bài: 11/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 18/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Phân loại cảng thủy nội địa phục vụ định hướng chính sách chuyển đổi xanh tại Việt Nam

Classification of inland waterway ports to guide green transition policies in Vietnam

> THS BÙI THỊ THÙY LINH*, TS NGUYỄN MINH ĐỨC
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: ducnguyen@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Xây dựng tiêu chuẩn tham chiếu đánh giá cảng thủy nội địa (TNĐ) xanh là một trong những nhiệm vụ được đề ra trong Quyết định 876/QĐ-TTg hướng tới việc thực hiện cam kết của Việt Nam tại Hội nghị COP26. Nghiên cứu này đề xuất khung phân loại cảng TNĐ làm cơ sở tham khảo cho chính sách phát triển cảng xanh tại Việt Nam, dựa trên mức độ ưu tiên chuyển đổi và năng lực thực hiện. Nghiên cứu kết hợp tổng hợp tài liệu, xây dựng tiêu chí và phân tích dữ liệu khảo sát 22 cảng TNĐ về chức năng, loại hàng, sản lượng, mức độ điện hóa thiết bị, quản lý môi trường và nguồn lực. Kết quả xác định 4 nhóm cảng TNĐ, trong đó nhóm cần hỗ trợ cấp thiết và nhóm có nền tảng thuận lợi chiếm đa số. Sự khác biệt giữa các nhóm cho thấy cần kết hợp các biện pháp hỗ trợ tài chính, kỹ thuật, đào tạo, khuyến khích đầu tư và chia sẻ kinh nghiệm phù hợp với từng nhóm. Khung phân loại cung cấp căn cứ tham khảo để lựa chọn đối tượng hỗ trợ và xây dựng lộ trình chuyển đổi phù hợp với điều kiện của các cảng.

Từ khóa: Cảng thủy nội địa; năng lực chuyển đổi; ưu tiên chuyển đổi; chính sách chuyển đổi xanh; vận tải đường thủy nội địa.

ABSTRACT

The task of developing reference standards for assessing green inland waterway ports (IWP) has been indicated in Decision 876/QĐ-TTg to fulfil Vietnam's commitment at COP26. This study proposes a framework for classifying IWP to guide green port development policies in Vietnam, based on transition priority and implementation capacity. The study combines a literature review, criteria development and analysis of survey data from 22 IWP covering functions, cargo types, throughput, equipment electrification, environmental management and resources. The results identify four port groups, among which IWP requiring support to address urgent issues and IWP having favorable foundation account for the majority. Differences between the groups indicate the need for tailored combinations of financial and technical support, training, investment incentives and experience sharing. The classification framework provides a basis for identifying support recipients and developing transition pathways suited to the conditions of individual ports.

Keywords: Inland waterway port; transition priority; implementation capacity; green transition policy; inland waterway transport.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cảng thủy nội địa là đầu mối tiếp nhận, xếp dỡ và trung chuyển hàng hóa, góp phần phát huy lợi thế vận tải thủy nhưng cũng phát sinh tác động môi trường từ sử dụng năng lượng và vận hành thiết bị. Chính sách phát triển cảng TNĐ xanh cần dựa trên điều kiện doanh nghiệp để bảo đảm tính khả thi và phân bổ hiệu quả nguồn lực. Các cảng TNĐ có nhiều khác biệt về loại hàng, sản lượng, thiết bị, phạm vi phục vụ, kết nối giao thông và quan hệ với cơ sở sản xuất hoặc khu vực đô thị nên cần được phân loại để lựa chọn gói hỗ trợ phù hợp. Phân loại theo quy mô hoặc loại hàng chưa phản ánh đầy đủ nhu cầu can thiệp và khả năng triển khai. Cảng cần cải thiện môi trường có thể thiếu vốn, nhân lực, hạ tầng; cảng đủ điều kiện lại cần cơ chế thúc đẩy đầu tư và giám sát. Vì vậy, kết hợp mức độ ưu tiên chuyển đổi xanh và năng lực thực hiện giúp nhận diện nhu cầu hỗ trợ, định hướng chính sách phù hợp từng nhóm cảng.

2. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU VỀ CHUYỂN ĐỔI XANH ĐỐI VỚI CẢNG THỦY NỘI ĐỊA

2.1. Nghiên cứu quốc tế

Cảng thủy nội địa là đầu mối kết nối vận tải đường thủy với các hoạt động sản xuất, lưu trữ và phân phối hàng hóa trên đất liền. Theo Luật số 48/2014/QH13 sửa đổi, bổ sung Luật Giao thông đường thủy nội địa, "Cảng thủy nội địa là hệ thống công trình được xây dựng để phương tiện, tàu biển neo đậu, xếp dỡ hàng hóa, đón trả hành khách và thực hiện dịch vụ hỗ trợ khác. Cảng thủy nội địa có vùng đất cảng và vùng nước cảng" [1]. Cách tiếp cận này cho thấy cảng không chỉ là cầu bến mà còn là một tổ hợp hạ tầng và hoạt động dịch vụ.

Cảng TNĐ khá đa dạng về chức năng và điều kiện khai thác. Tại Hà Lan, sự hiện diện của bến container, tính đa dạng của hàng hóa và khả năng tiếp cận mạng lưới đường bộ giúp giải thích quy mô và tăng trưởng của cảng TNĐ [2]. Đồng thời, quản trị cảng cần được đặt trong quan hệ với đô thị và hành lang vận tải, thay vì chỉ xem xét các hoạt động bên trong ranh giới cảng [3]. Những kết quả này tạo căn cứ cho việc phân tích cảng theo nhiều chiều và xem xét điều kiện riêng khi xây dựng định hướng phát triển.

Lợi ích của cảng TNĐ cần được xem xét ở cấp chuỗi vận tải song song với các tác động phát sinh tại cảng. Nghiên cứu về Việt Nam của World Bank (2019) ghi nhận tiềm năng giảm phát thải của vận tải thủy so với đường bộ, đồng thời nhấn mạnh nhu cầu cải thiện hạ tầng, thể chế và tài chính để khai thác lợi thế này [4]. Tuy nhiên, lợi ích của phương thức vận tải không đồng nghĩa với việc các đầu mối cảng đã có hoạt động môi trường hiệu quả.

Mặt khác, các nguồn tác động tới môi trường tại cảng TNĐ bao gồm sử dụng năng lượng của thiết bị và phương tiện, bụi và rơi vãi trong xếp dỡ, nước chảy tràn qua khu vực lưu trữ hàng, chất thải, tiếng ồn và nguy cơ sự cố. Loại hàng và công nghệ khai thác giúp nhận diện áp lực tiềm tàng; mức độ tác động thực tế còn phụ thuộc vào cường độ hoạt động, hiệu quả kiểm soát và đặc điểm khu vực chịu ảnh hưởng. Vì vậy, đánh giá chuyển đổi xanh cần kết hợp thông tin khai thác với bằng chứng về quản lý và kết quả môi trường.

Các nghiên cứu quốc tế cho thấy đánh giá môi trường cảng đang được mở rộng từ ghi nhận thực hành sang hỗ trợ xác định ưu tiên và hành động cải thiện. Seguí et al. (2016) sử dụng khảo sát phù hợp với điều kiện cảng TNĐ để xây dựng đường cơ sở về hoạt động môi trường [5]. Gần đây, GRIP-ESMS được phát triển nhằm hỗ trợ cảng lập hồ sơ phát thải, đánh giá mức sẵn sàng số, lựa chọn hành động và xây dựng lộ trình có sự tham gia của các bên liên quan [6]. Hai hướng tiếp cận này bổ sung cho nhau: Đường cơ sở cho biết cảng đang ở đâu, trong khi chẩn đoán và lập lộ trình giúp xác định những thay đổi cần thực hiện.

2.2. Nghiên cứu trong nước

Ở Việt Nam, các nghiên cứu được rà soát cung cấp bằng chứng về điều kiện phát triển vận tải thủy và hiệu quả khai thác, nhưng chưa trực tiếp giải quyết đầy đủ việc phân loại cảng phục vụ chuyển đổi xanh. Nghiên cứu của nhóm tác giả Nguyễn và Bùi (2026) xem xét các yếu tố về tuyến luồng, kết nối và khả năng làm hàng tại cảng, công nghệ quản lý và cơ chế chính sách trong đánh giá năng lực cạnh tranh vận tải thủy phía Bắc [7]. Ở Đồng bằng sông Cửu Long, Wang và Truong (2026) sử dụng DEA và chỉ số năng suất Malmquist để phân tích hiệu quả động của mười cảng trong giai đoạn 2019 - 2023 [8]. Các nghiên cứu này bổ sung căn cứ về điều kiện hạ tầng và khai thác, song hiệu quả hoạt động không thể được sử dụng thay thế trực tiếp cho mức độ ưu tiên hoặc năng lực chuyển đổi xanh.

2.3. Khoảng trống nghiên cứu

Phần tổng quan nghiên cứu cho thấy việc kết hợp nhu cầu cải thiện môi trường với năng lực thực hiện để phân loại cảng TNĐ phục vụ chính sách chuyển đổi xanh tại Việt Nam chưa được làm rõ. Đánh giá riêng theo quy mô, loại hàng hoặc thực hành môi trường chưa phản ánh đồng thời mức độ cần can thiệp và khả năng triển khai giải pháp của từng cảng. Khoảng trống này đặt ra yêu cầu xây dựng một khung phân loại liên kết hai chiều đánh giá, qua đó hỗ trợ lựa chọn đối tượng và nội dung chính sách phù hợp.

Đóng góp mới của nghiên cứu này thể hiện ở việc cụ thể hóa hai chiều phân loại mức độ ưu tiên chuyển đổi xanh và năng lực thực hiện thành bộ tiêu chí và quy tắc đánh giá thống nhất; áp dụng khung này đối với dữ liệu khảo sát 22 cảng TNĐ tại Việt Nam để xác định 4 nhóm cảng, đồng thời đề xuất định hướng hỗ trợ tương ứng với nhu cầu và điều kiện của từng nhóm.

3. KHUNG PHÂN LOẠI CẢNG THỦY NỘI ĐỊA

Chuyển đổi xanh tại Việt Nam được gắn với định hướng chuyển đổi năng lượng và giảm phát thải ngành Giao thông vận tải theo Quyết định số 876/QĐ-TTg năm 2022 [9]. Nghiên cứu này tiếp cận chuyển đổi xanh cấp cảng TNĐ qua hai nội dung: Giảm tác động môi trường hiện hữu và xây dựng điều kiện triển khai cải thiện, bao gồm công nghệ, năng lượng, quản lý, vận hành và phối hợp.

Nhu cầu môi trường không tự động chuyển thành hành động. Vejvar et al. (2018) cho thấy cảng có phản ứng khác nhau trước áp lực bền vững, trong đó nổi bật là cân nhắc kinh tế, còn môi trường thường được tiếp cận theo hướng tuân thủ tối thiểu [10]. Lawer et al. (2019), trong nghiên cứu về cảng biển, nhấn mạnh ảnh hưởng của bối cảnh đến lựa chọn công cụ xanh [11], gợi ý giải pháp cần phù hợp nguồn lực và tổ chức.

Quan điểm dựa trên nguồn lực tự nhiên (NRBV) của Hart (1995) cung cấp cơ sở đánh giá năng lực tổ chức thực hiện chiến lược môi trường [12]. Năng lực cần gắn với giải pháp cụ thể vì kiểm soát bụi và điện hóa có yêu cầu khác nhau; quy mô lớn hoặc công nghệ hiện đại chưa đủ chứng minh năng lực chuyển đổi cao. Logic Áp lực-Hiện trạng-Đáp ứng (OECD, 2019) được vận dụng để xác định ưu tiên [13]. Khi thiếu số liệu, chỉ đánh giá áp lực tiềm tàng và thiếu hụt kiểm soát, không suy diễn thành ưu tiên thấp.

Từ phần tổng quan tài liệu trên, nghiên cứu đề xuất hai chiều phân loại độc lập đối với cảng thủy nội địa:

Mức độ ưu tiên chuyển đổi xanh phản ánh nhu cầu can thiệp, gồm 5 tiêu chí: (i) Áp lực ô nhiễm và hiệu quả kiểm soát; (ii) nhu cầu tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải; (iii) khoảng trống quản lý môi trường; (iv) điều chỉnh giải pháp khi mở rộng, thay đổi hoạt động; (v) tác động của điều kiện môi trường đến cảng. Nội dung xem xét gồm bụi, nước thải, tiếng ồn, rơi vãi, năng lượng thiết bị, chất thải, phòng ngừa sự cố và ảnh hưởng đến cộng đồng, nguồn nước, hệ sinh thái.

Ưu tiên cao khi nhiều tiêu chí thể hiện nhu cầu can thiệp lớn hoặc có vấn đề nghiêm trọng được xác minh cần xử lý ngay; thấp khi phần lớn tác động được kiểm soát, có bằng chứng và không còn vấn đề nghiêm trọng chưa xử lý. Thiếu dữ liệu được ghi nhận là chưa đủ cơ sở đánh giá.

Năng lực thực hiện chuyển đổi xanh phản ánh khả năng triển khai, duy trì giải pháp, gồm 6 tiêu chí: (i) Cam kết và tổ chức; (ii) tài chính; (iii) hạ tầng, tích hợp công nghệ; (iv) nhân sự; (v) dữ liệu; (vi) phối hợp. Cảng cần có kế hoạch, trách nhiệm, vốn đầu tư và vận hành, bảo dưỡng khả thi; hạ tầng tương thích, chuyên môn phù hợp, dữ liệu giám sát hiệu quả và cơ chế phối hợp.

Năng lực cao khi đáp ứng điều kiện thiết yếu để triển khai, duy trì giải pháp; thấp khi thiếu ít nhất một điều kiện thiết yếu chưa có phương án khắc phục khả thi. Đánh giá phải gắn với gói giải pháp dự kiến.

Kết hợp hai chiều đánh giá hình thành 4 nhóm phân loại (Hình 1). Nhóm I có ưu tiên cao, năng lực thấp, cần hỗ trợ xử lý vấn đề cấp thiết và chuyển đổi từng bước. Nhóm II có ưu tiên và năng lực cao, có thể đầu tư công nghệ, cải tiến vận hành, quản lý xanh. Nhóm III có ưu tiên thấp, năng lực thấp, cần củng cố quản lý môi trường, nguồn lực và áp dụng giải pháp phù hợp quy mô. Nhóm IV có ưu tiên thấp, năng lực cao, ít vấn đề cấp thiết, cần duy trì cải tiến, phát triển chuyển đổi và chia sẻ kinh nghiệm.



Hình 1. Ma trận phân loại cảng TNĐ phục vụ chính sách cảng xanh

4. THU THẬP, XỬ LÝ VÀ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU

4.1. Thu thập dữ liệu

Để kiểm chứng khung đánh giá trên, nghiên cứu triển khai khảo sát với đối tượng là 22 doanh nghiệp khai thác cảng TNĐ thuộc phạm vi quản lý của Cảng vụ Đường thủy nội địa khu vực I, II, III, IV và Cảng vụ Quảng Ninh. Các doanh nghiệp được lựa chọn khảo sát bao gồm nhiều loại hình cảng khác nhau từ cảng container, cảng tổng hợp đến cảng chuyên dùng phục vụ công nghiệp, qua đó phản ánh tương đối đầy về hệ thống cảng TNĐ cả nước.

Tại mỗi cảng, nhóm nghiên cứu đã làm việc với lãnh đạo doanh nghiệp, phỏng vấn cán bộ chuyên môn và khảo sát hiện trường. Phương pháp khảo sát thực địa kết hợp với phỏng vấn bán cấu trúc và quan sát trực tiếp, giúp kiểm chứng thông tin do doanh nghiệp cung cấp và ghi nhận những yếu tố khó phản ánh qua bảng hỏi.

Phương pháp tam giác hóa dữ liệu được sử dụng nhằm nâng cao độ tin cậy của kết quả. Ba nguồn dữ liệu chính được sử dụng gồm: (1) Dữ liệu khảo sát thực địa; (2) Tài liệu do doanh nghiệp cung cấp và (3) Nguồn thông tin công khai. Việc kết hợp ba nguồn dữ liệu giúp hạn chế sai lệch do chỉ dựa vào phỏng vấn hoặc tài liệu thứ cấp, đồng thời tăng khả năng kiểm chứng các nhận định trong nghiên cứu.

4.2. Xử lý dữ liệu

Dữ liệu khảo sát được xử lý bằng Microsoft Excel, mỗi dòng là một cảng TNĐ, mỗi cột là một biến hoặc tiêu chí. Biến định lượng được giữ nguyên giá trị, thống nhất đơn vị; thuộc tính có/không được mã hóa 1/0.

Hai chiều phân loại sử dụng thang Likert 5 mức: Rất thấp (1), thấp (2), trung bình (3), cao (4), rất cao (5). Điểm cao thể hiện nhu cầu can thiệp lớn đối với chiều ưu tiên chuyển đổi xanh hoặc khả năng đáp ứng tốt đối với chiều năng lực thực hiện.

Điểm mỗi chiều là trung bình cộng các tiêu chí, với trọng số bằng nhau. Điểm từ 3 trở lên thuộc mức cao, dưới 3 thuộc mức thấp; cảng đạt 3 ở cả hai chiều thuộc nhóm II. Đây là quy ước phân nhóm, nên mức cao bao gồm cả mức trung bình của thang đo ban đầu. Phân loại sử dụng điểm chưa làm tròn, trường hợp tại hoặc sát ngưỡng được kiểm tra độ ổn định.

Thông tin thiếu không tự động quy đổi thành điểm mà được bổ sung qua phỏng vấn, hồ sơ doanh nghiệp và quan sát hiện trường. Nếu vẫn thiếu, mỗi chiều chỉ được tính bằng trung bình các điểm hợp lệ khi có dữ liệu cho ít nhất 80% tiêu chí áp dụng. Tiêu chí không áp dụng được loại khỏi phép tính, kèm lý do.

Ngưỡng 80% là quy ước phương pháp chưa được kiểm định, nhằm bảo đảm điểm tổng hợp dựa trên phần lớn tiêu chí. Với 5 tiêu chí ưu tiên và 6 tiêu chí năng lực, cần tối thiểu 4 và 5 tiêu chí tương ứng. Nghiên cứu đồng thời xem xét tính thiết yếu của thông tin thiếu và khả năng chuyển nhóm khi điểm thiếu nhận giá trị thấp nhất hoặc cao nhất. Trường hợp không đáp ứng độ đầy đủ dữ liệu, thiếu thông tin thiết yếu hoặc chưa xác định chắc chắn nhóm được ghi nhận là chưa đủ cơ sở phân loại.

4.3. Kết quả phân tích dữ liệu

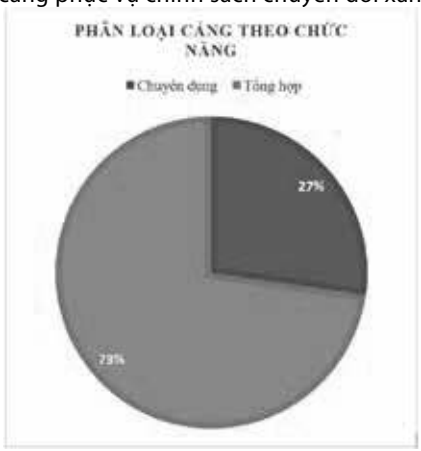
4.3.1. Đặc điểm khai thác và nhu cầu chuyển đổi xanh của cảng

a) Về chức năng và loại hàng

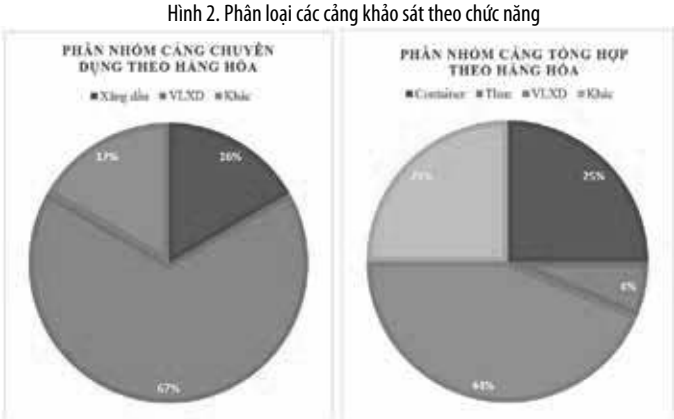
Kết quả khảo sát cho thấy cảng tổng hợp chiếm 73%, cảng chuyên dùng chiếm 27% (Hình 2), phản ánh chức năng phục vụ đa dạng hàng hóa của phần lớn cảng, bên cạnh nhóm phục vụ nhu cầu riêng của nhà máy, khu công nghiệp.

Trong nhóm cảng chuyên dùng, cảng vật liệu xây dựng chiếm 67%, xăng dầu 16% và hàng khác 17% (Hình 3), tập trung phục vụ sản xuất, xây dựng. Khác biệt về hàng hóa đòi hỏi phân biệt công nghệ xếp dỡ, lưu trữ và biện pháp kiểm soát môi trường. Với cảng tổng hợp, vật liệu xây dựng chiếm 44%, container và hàng khác cùng chiếm 25%, than chiếm 6%. Vật liệu xây dựng nổi bật ở cả hai loại hình; sự hiện diện của container chưa đủ chứng minh mức độ tích hợp với cảng biển hoặc chất lượng dịch vụ logistics.

Cơ cấu chức năng và loại hàng giúp xác định ưu tiên chuyển đổi xanh. Cảng vật liệu xây dựng và than cần đánh giá bụi, rơi vãi, nước chảy tràn qua bãi; cảng xăng dầu chú trọng rò rỉ, tràn dầu và nước nhiễm dầu; cảng container tập trung vào năng lượng thiết bị, vận chuyển nội bộ và thời gian chờ phương tiện. Các đặc điểm này là căn cứ lựa chọn nội dung đánh giá, cần kết hợp với hiệu quả kiểm soát môi trường và nguồn lực thực hiện khi phân loại cảng phục vụ chính sách chuyển đổi xanh.



Hình 2. Phân loại các cảng khảo sát theo chức năng

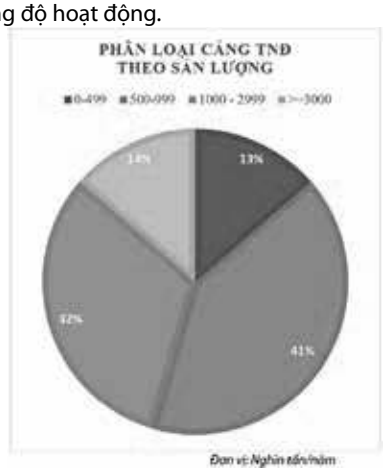


Hình 3. Phân loại các cảng khảo sát theo hàng hóa xếp dỡ

b) Quy mô khai thác

Theo sản lượng bình quân giai đoạn 2023 - 2025, 22 cảng khảo sát có quy mô khai thác khác biệt (Hình 4). Nhóm 500 - 999 nghìn tấn/năm chiếm 41%; nhóm 1.000 - 2.999 nghìn tấn/năm chiếm 32%; hai nhóm dưới 500 và từ 3.000 nghìn tấn/năm trở lên cùng chiếm 13,6%. Như vậy, 73% số cảng tập trung ở mức 500 - 2.999 nghìn tấn/năm.

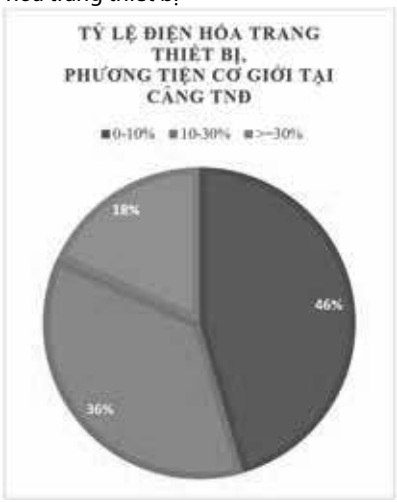
Sản lượng phản ánh hoạt động thực tế và là chỉ báo ban đầu về áp lực khai thác, làm căn cứ lựa chọn giải pháp phù hợp. Cảng sản lượng cao cần đánh giá nhu cầu năng lượng và tác động tích lũy; cảng sản lượng thấp cần xem xét tính khả thi, chi phí duy trì giải pháp theo cường độ hoạt động.



Đơn vị: Nghìn tấn/năm

Hình 4. Phân loại các cảng khảo sát theo sản lượng

c) Tỷ lệ điện hóa trang thiết bị



Hình 5. Tỷ lệ điện hóa trang thiết bị

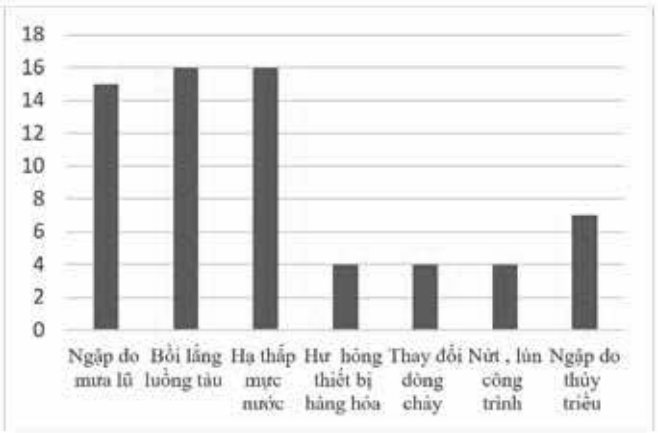
Tỷ lệ điện hóa tại cảng TNĐ được tính bằng phần trăm số thiết bị, phương tiện cơ giới sử dụng điện trên tổng số thiết bị, phương tiện do cảng sở hữu hoặc thuê để phục vụ khai thác. Chỉ báo này phản ánh hiện trạng công nghệ và nhu cầu cải thiện năng lượng.

Khảo sát cho thấy mức độ điện hóa còn hạn chế và khác biệt giữa các cảng (Hình 5). Nhóm điện hóa 0 - 10% chiếm 46%; nhóm 10 - 30% chiếm 36%; nhóm từ 30% trở lên chiếm 18%. Như vậy, 82% số cảng thuộc hai nhóm điện hóa thấp, cho thấy thiết bị điện chưa phổ biến tại phần lớn cảng khảo sát.

Các cảng CFG Ninh Bình, Thái Hà, trạm Nghiền Long An và Nhà máy xi măng An Giang có tỷ lệ điện hóa trên 40%, đều có tiềm lực tài chính tốt và động lực đầu tư nhằm tối ưu chi phí vận hành. Ngược lại, các cảng Hải Linh, Phú Thái, Sơn Thái, An Sơn, Thạnh Phước, bê tông Hùng Vương, Thiên Lộc Thành và Quang Vinh chưa sử dụng thiết bị xếp dỡ hoặc phương tiện vận chuyển hàng hóa chạy điện. Nguyên nhân được chia sẻ là vốn đầu tư lớn hoặc chưa nhận diện rõ lợi ích kinh tế.

Kết quả cho thấy dư địa điện hóa còn lớn, nhưng cần lộ trình phù hợp từng cảng. Nhóm điện hóa thấp cần đánh giá hạ tầng điện, công nghệ thay thế, nguồn vốn và năng lực vận hành, bảo dưỡng; nhóm từ 30% trở lên có thể cung cấp kinh nghiệm tham khảo.

d) Tác động của điều kiện môi trường đến hoạt động cảng



Hình 6. Các tác động môi trường đến cảng thủy nội địa

Trong 3 năm gần đây, bồi lắng luồng tàu và hạ thấp mực nước là hai tác động phổ biến nhất, mỗi loại ghi nhận tại 16 cảng (72,7%); tiếp theo là ngập do mưa lũ tại 15 cảng (68,2%) và thủy triều tại 7 cảng (31,8%). Hư hỏng thiết bị, hàng hóa; thay đổi dòng chảy; nứt, lún công trình đều xuất hiện tại 4 cảng (18,2%) (Hình 6). Kết quả cho thấy điều kiện thủy văn và duy trì độ sâu tiếp cận là những vấn đề đáng chú ý. Mực nước hạ thấp hạn chế tiếp nhận phương tiện, ảnh hưởng tải trọng khai thác và tăng nhu cầu duy tu luồng.

Phát triển cảng xanh cần kết hợp giảm tác động môi trường với nâng cao khả năng thích ứng thông qua tổ chức khai thác phù hợp điều kiện luồng, cải thiện thoát nước, bảo vệ thiết bị, hàng hóa, kiểm tra công trình và lập kế hoạch ứng phó kèm phương án duy trì hoạt động.

4.3.2. Phân nhóm theo nhu cầu chuyển đổi và năng lực thực hiện

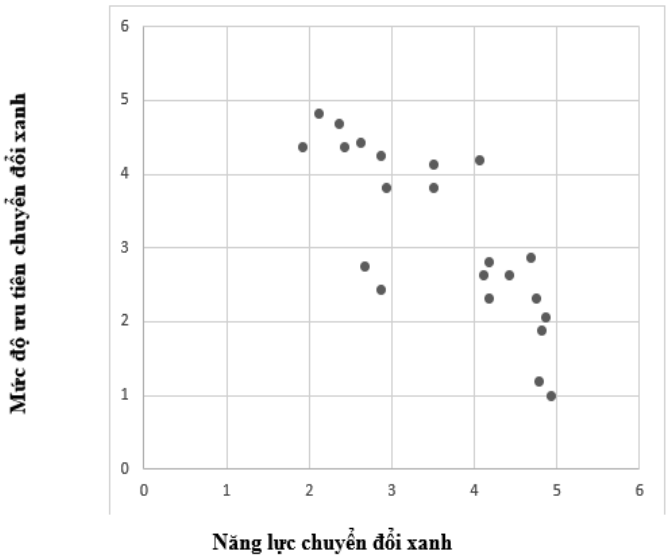
Sử dụng ma trận hai trục, đánh giá mức độ ưu tiên chuyển đổi xanh và năng lực thực hiện từ thấp đến cao, 22 cảng TNĐ đã được phân thành 4 nhóm (Hình 7).

Nhóm IV gồm 10 cảng (45,5%), có ưu tiên thấp và năng lực cao. Cảng Lam Thạch, CFG Ninh Bình, xăng dầu Đức Giang và Thốt Nốt đã thực hiện chuyển đổi năng lượng, sử dụng trang thiết bị chạy điện, chú trọng quản lý môi trường. Nguồn lực tài chính hoặc hỗ trợ từ công ty chủ quản tạo nền tảng duy trì chuyển đổi và cải thiện hiệu quả môi trường.

Nhóm I gồm 7 cảng (31,8%), có ưu tiên cao nhưng năng lực thấp, sản lượng dưới 1 triệu tấn/năm, chưa điện hóa thiết bị xếp dỡ, phương tiện vận chuyển và còn hạn chế về quản lý môi trường. Nhóm này cần hỗ trợ quản lý và điều kiện triển khai giải pháp phù hợp quy mô.

Nhóm II (13,6%) có ưu tiên và năng lực cao, tập trung các cảng chuyên dùng xi măng, vật liệu xây dựng. Trước áp lực môi trường tiềm tàng từ hàng hóa, nhóm này cần cụ thể hóa kế hoạch thành đầu tư và cải tiến vận hành, hoàn thiện biện pháp kiểm soát.

Nhóm III (9,1%) có ưu tiên thấp, năng lực hạn chế, sản lượng trên 500 nghìn tấn/năm nhưng tài chính và quản lý chưa đáp ứng yêu cầu. Các cảng này cần được hỗ trợ củng cố quản lý, nâng cao nhận thức và từng bước bố trí nguồn lực chuyển đổi xanh.



Hình 7. Phân loại cảng TNĐ theo ma trận

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Nghiên cứu đề xuất và áp dụng khung phân loại cảng TNĐ theo mức độ ưu tiên chuyển đổi xanh và năng lực thực hiện. Khảo sát 22 cảng xác định bốn nhóm: Nhóm I có ưu tiên cao nhưng năng lực hạn chế, cần hỗ trợ kỹ thuật, quản lý môi trường và tín dụng xanh; nhóm II cần kiểm soát tác động môi trường và cải tiến công nghệ; nhóm III cần củng cố quản lý, nguồn lực trước khi mở rộng đầu tư; nhóm IV có nền tảng thuận lợi, đã triển khai chuyển đổi, cần theo dõi hiệu quả và chia sẻ kinh nghiệm.

Quy mô khai thác hoặc loại hàng riêng lẻ chưa đủ xác định định hướng chuyển đổi xanh. Kết hợp nhu cầu môi trường với năng lực thực hiện giúp phân biệt các cảng cần hỗ trợ nền tảng và các cảng có thể triển khai đầu tư, làm căn cứ lựa chọn nội dung, thứ tự ưu tiên chính sách.

Kết luận của nghiên cứu còn giới hạn trong mẫu khảo sát; hiệu quả thực tế của các công cụ chính sách đề xuất chưa được kiểm định. Nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng mẫu, bổ sung dữ liệu môi trường và kiểm tra độ ổn định của kết quả phân loại.

5.2. Kiến nghị

Chính sách phát triển cảng TNĐ xanh cần phù hợp với mức độ ưu tiên và năng lực từng nhóm, gắn hỗ trợ với nhu cầu, tính khả thi và kết quả cải thiện, đồng thời bảo đảm yêu cầu bảo vệ môi trường chung.

Đối với nhóm I, ưu tiên khắc phục thiếu hụt môi trường cấp thiết và xây dựng năng lực thông qua tư vấn kỹ thuật, đào tạo quản lý, hỗ trợ vốn phù hợp quy mô. Điện hóa thiết bị cần dựa trên đánh giá hạ tầng điện, nhu cầu sử dụng và chi phí vận hành. Công tác giải ngân nên theo tiến độ, gắn với kết quả kiểm soát môi trường và khả năng duy trì sau đầu tư.

Đối với nhóm II, khuyến khích chuyển nguồn lực sẵn có thành dự án cụ thể. Cảng chuyên dùng phục vụ xi măng, vật liệu xây dựng cần ưu tiên kiểm soát bụi, rơi vãi, nước chảy tràn và sử dụng năng lượng hiệu quả. Hỗ trợ tín dụng hoặc đồng tài trợ cần có mục tiêu môi trường rõ ràng, vốn đối ứng và báo cáo kết quả; lựa chọn dự án thí điểm để đánh giá trước khi nhân rộng.

Đối với nhóm III, tập trung củng cố quản lý, giảm chi phí tiếp cận thông qua hướng dẫn thực hành, đào tạo theo cụm, theo dõi năng lượng, chất thải và tư vấn giải pháp phù hợp. Khuyến khích dùng chung dịch vụ tư vấn, quan trắc, đào tạo; triển khai từng bước theo khả năng nguồn lực. Ưu tiên thấp không đồng nghĩa với giảm yêu cầu tuân thủ môi trường.

Đối với nhóm IV, khuyến khích cải tiến liên tục, kiểm chứng kết quả, công bố chỉ số môi trường và xây dựng mô hình trình diễn về năng lượng, điện hóa, khai thác hiệu quả. Hỗ trợ tài chính nên tập trung vào lợi ích môi trường tăng thêm. Các cảng có kết quả được xác minh có thể chia sẻ kinh nghiệm, hỗ trợ kỹ thuật cho cảng còn hạn chế năng lực.

Để triển khai, cần xây dựng cơ sở dữ liệu cấp cảng, công khai tiêu chí hỗ trợ và cập nhật phân loại định kỳ. Hiệu quả được đánh giá bằng chỉ số phù hợp từng dự án, như tiêu hao năng lượng, nhiên liệu thay thế, kiểm soát bụi hoặc chất lượng nước thải.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Xây dựng trong Nhiệm vụ khoa học công nghệ mã số RD02-26.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giao thông đường thủy nội địa. Luật số 48/2014/QH13, ngày 17 tháng 6 năm 2014. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?docid=175352&pageid=27160.

[2] B. Wiegmans, P. Witte and T. Spit. Characteristics of European inland ports: A statistical analysis of inland waterway port development in Dutch municipalities. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 78, pp. 566-577, 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.07.004.

[3] P. Witte, B. Wiegmans, F. van Oort and T. Spit. Governing inland ports: A multi-dimensional approach to addressing inland port-city challenges in European transport corridors. Journal of Transport Geography, vol. 36, pp. 42-52, 2014, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.011.

[4] World Bank. Sustainable Development of Inland Waterways Transport in Vietnam: Strengthening the Regulatory, Institutional and Funding Frameworks. Washington, DC, USA: World Bank, 2019. Internet: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/214851554188572807.

[5] X. Seguí, M. Puig, E. Quintieri, C. Wooldridge and R. M. Darbra. New environmental performance baseline for inland ports: A benchmark for the European inland port sector. Environmental Science & Policy, vol. 58, pp. 29-40, 2016, doi: 10.1016/j.envsci.2015.12.014.

[6] Green Inland Ports. Task 4: ESMS and pilot implementation of ESMS in selected inland ports (accessed: Oct. 5, 2026). Internet: https://green-inland-ports.eu/about/task-4-esms-and-pilot-implementation-of-esms-in-selected-inland-ports/.

[7] T. L. Nguyễn và T. H. Bùi. Đánh giá ảnh hưởng tuyến luồng vận tải thủy nội địa khu vực phía Bắc đến năng lực cạnh tranh của ngành vận tải thủy nội địa Việt Nam. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 85, tr. 220-226, 2026, doi: 10.65154/jmst.960.

[8] C.-N. Wang and T.-T. Truong. Assessing the technological capabilities and efficiency of inland ports in Vietnam's Mekong Delta: A hybrid DEA approach post-COVID-19. Scientific Reports, vol. 16, Art. no. 10157, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-41041-0.

[9] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 876/QĐ-TTg, ngày 22 tháng 7 năm 2022 Phê duyệt Chương trình hành động về chuyển đổi năng lượng xanh, giảm phát thải khí các-bon và khí mê-tan của ngành giao thông vận tải. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?docid=206188&pageid=27160.

[10] M. Vejvar, K.-H. Lai, C. K. Y. Lo and E. W. M. Fürst. Strategic responses to institutional forces pressuring sustainability practice adoption: Case-based evidence from inland port operations. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 61, pp. 274-288, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.08.014.

[11] E. T. Lawer, J. Herbeck and M. Flitner. Selective adoption: How port authorities in Europe and West Africa engage with the globalizing 'green port' idea. Sustainability, vol. 11, no. 18, Art. no. 5119, 2019, doi: 10.3390/su11185119.

[12] S. L. Hart. A natural-resource-based view of the firm. Academy of Management Review, vol. 20, no. 4, pp. 986-1014, 1995, doi: 10.2307/258963.

[13] OECD. Biodiversity: Finance and the Economic and Business Case for Action. Paris, France: OECD Publishing, 2019, doi: 10.1787/a3147942-en.

■Ngày nhận bài: 02/10/2026 ■Ngày sửa bài: 13/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/10/2026

Phát triển khung SWITCH đánh giá các rào cản thực hiện ESG tại các ban quản lý dự án xây dựng ở các tỉnh phía Nam: Nghiên cứu Delphi

Developing a SWITCH-Based Framework for assessing barriers to ESG Implementation in construction project management units in Southern Vietnam: A Delphi Study

> KS HUỲNH TẤN ĐIỆN[1], PGS.TS LƯU TRƯỜNG VĂN[2,*]
[1]HVCH ngành Quản lý xây dựng, Khoa Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh
[2]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh
[*]Email: van.luu@ou.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu phát triển khung đánh giá các rào cản thực hiện ESG tại các Ban quản lý dự án (BQLDA) xây dựng ở các tỉnh phía Nam Việt Nam dựa trên mô hình SWITCH. Từ tổng quan các nghiên cứu về ESG, xây dựng bền vững và quản lý dự án, 28 rào cản ban đầu được nhận dạng và sắp xếp theo ba thành phần: định hướng nhận thức và hành động (Direct the Rider), tạo động lực và cam kết thay đổi (Motivate the Elephant), và định hình môi trường thực hiện (Shape the Path). Các rào cản được sàng lọc qua ba vòng Delphi với 15 chuyên gia và đánh giá bằng quy tắc KAMET. Kết quả giữ lại 25 rào cản, gồm 8 rào cản thuộc Direct the Rider, 8 thuộc Motivate the Elephant và 9 thuộc Shape the Path; 3 rào cản không đạt tiêu chí đồng thuận được loại khỏi khung cuối cùng. Các điểm nghẽn được nhận diện trải rộng từ hiểu biết và năng lực thực hiện đến mức độ ưu tiên, phân bổ nguồn lực, quy trình, hợp đồng, dữ liệu và phối hợp giữa các bên. Khung đề xuất vì vậy tạo được một cấu trúc tương đối rõ cho việc nhận diện rào cản ở cấp BQLDA và làm cơ sở cho bước kiểm định định lượng tiếp theo.

Từ khóa: Ban quản lý dự án; ESG; mô hình SWITCH; Delphi.

ABSTRACT

This study develops a framework for assessing barriers to ESG implementation in construction Project Management Units (PMUs) in Southern Vietnam using the SWITCH model. Drawing on studies of ESG, sustainable construction, and project management, 28 initial barriers were identified and organized into three components: Direct the Rider, Motivate the Elephant, and Shape the Path. The barriers were screened through three Delphi rounds involving 15 experts and assessed using the KAMET consensus criteria. The final framework retained 25 barriers, including eight under Direct the Rider, eight under Motivate the Elephant, and nine under Shape the Path, while three barriers that did not meet the consensus criteria were excluded. The retained barriers cover understanding and implementation capability, organizational priorities, resource allocation, procedures, contracts, data management, and coordination among project participants. The framework provides a coherent structure for examining ESG implementation barriers at the PMU level, supports the identification of implementation bottlenecks, and provides a basis for subsequent quantitative validation of the relationships between the three barrier groups and ESG implementation in construction PMUs.

Keywords: Delphi method; ESG; Project Management Units; SWITCH model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát triển bền vững (PTBV) đang mở rộng cách đánh giá hiệu quả dự án, từ chi phí, tiến độ và chất lượng sang đồng thời xem xét các tác động môi trường, xã hội và yêu cầu quản trị [2]. Trong xu hướng đó, ESG (Environmental, Social and Governance) ngày càng được sử dụng như một khung tham chiếu để nhận diện rủi ro, nâng cao trách nhiệm và hỗ trợ ra quyết định dài hạn [3, 4]. Đối với ngành Xây dựng, vấn đề này đặc biệt đáng chú ý do dự án gắn với tiêu thụ tài nguyên, phát sinh chất thải, an toàn lao động, cộng đồng và sự tham gia của nhiều chủ thể [12].

Ở cấp dự án, BQLDA giữ vai trò chuyển các yêu cầu ESG thành nội dung quản lý cụ thể thông qua chuẩn bị dự án, thiết kế, lựa chọn nhà thầu, hợp đồng, giám sát thi công, phối hợp và báo cáo [1]. Vì vậy, thực hiện ESG tại BQLDA liên quan trực tiếp đến việc đưa các yêu cầu môi trường, xã hội và quản trị vào hồ sơ, quy trình, trách nhiệm và cơ chế kiểm soát. Quá trình này có thể gặp trở ngại khi cán bộ chưa hiểu đầy đủ về ESG, thiếu hướng dẫn và phương pháp đo lường, nguồn lực hạn chế, lãnh đạo chưa ưu tiên, dữ liệu phân tán

hoặc phối hợp giữa các bên chưa rõ ràng [4, 5, 6, 7].

Các nghiên cứu trước đã nhận diện nhiều rào cản về nhận thức, năng lực, chi phí, pháp lý, công nghệ, dữ liệu, cam kết lãnh đạo và văn hóa tổ chức. Tuy nhiên, phần lớn được xem xét ở cấp doanh nghiệp, ngành hoặc dự án nói chung, trong khi BQLDA là chủ thể trực tiếp chuyển các yêu cầu ESG thành tiêu chí lựa chọn nhà thầu, điều khoản hợp đồng, nội dung giám sát và báo cáo. Đồng thời, các rào cản thường được nghiên cứu riêng lẻ, chưa làm rõ sự gắn kết giữa hiểu biết, động lực thay đổi và điều kiện của hệ thống quản lý dự án. Đây là khoảng trống cần được xem xét trong bối cảnh các BQLDA xây dựng ở các tỉnh phía Nam.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu vận dụng mô hình SWITCH của Chip và Dan Heath với ba thành phần: định hướng nhận thức và hành động (Direct the Rider), tạo động lực và cam kết thay đổi (Motivate the Elephant), và định hình môi trường thực hiện (Shape the Path). Các rào cản được tổng hợp từ tài liệu trước, cấu trúc theo ba nhóm SWITCH và tiếp tục sàng lọc, hiệu chỉnh bằng phương pháp Delphi. Kết quả hướng đến hình thành khung đánh giá phù hợp với chức năng của BQLDA và làm cơ sở cho kiểm định định lượng ở giai đoạn tiếp theo.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. ESG, rào cản thực hiện và mô hình SWITCH trong quản lý dự án xây dựng (QLDAXD)

ESG là khuôn khổ xem xét đồng thời các vấn đề về môi trường, xã hội và quản trị trong hoạt động và quá trình ra quyết định của tổ chức. Trong lĩnh vực xây dựng, khía cạnh môi trường gắn với sử dụng tài nguyên, năng lượng, nước, phát thải và chất thải; khía cạnh xã hội liên quan đến sức khỏe, an toàn lao động, điều kiện làm việc, cộng đồng và các bên liên quan; trong khi quản trị tập trung vào minh bạch, tuân thủ, quản lý rủi ro, phân định trách nhiệm và trách nhiệm giải trình [8, 14, 15]. Vì vậy, ESG có thể được xem như một khung quản trị hỗ trợ đưa các yêu cầu phát triển bền vững vào quá trình ra quyết định và kiểm soát dự án.

Đối với BQLDA xây dựng, thực hiện ESG chủ yếu diễn ra thông qua các chức năng quản lý mà Ban được giao. Các yêu cầu ESG có thể được đưa vào công tác chuẩn bị dự án, quản lý thiết kế, lựa chọn nhà thầu, hợp đồng, giám sát thi công, quản lý dữ liệu, báo cáo và phối hợp các bên liên quan. BQLDA không trực tiếp thực hiện toàn bộ các hoạt động ESG tại hiện trường, nhưng giữ vai trò chuyển các yêu cầu này thành trách nhiệm, tiêu chí kiểm soát và cơ chế giám sát đối với tư vấn, nhà thầu và các chủ thể tham gia dự án [4, 8, 15].

Quá trình đưa ESG vào quản lý dự án vẫn gặp nhiều trở ngại. Các nghiên cứu về xây dựng bền vững và ESG ghi nhận những khó khăn liên quan đến nhận thức và kiến thức, hướng dẫn và tiêu chuẩn, nguồn nhân lực, chi phí thực hiện, công nghệ và dữ liệu, cam kết của lãnh đạo và sự phối hợp giữa các bên [4, 5, 6, 7, 9]. Các rào cản này có thể tác động qua lại: hạn chế về nhận thức làm giảm khả năng xác định yêu cầu ESG; thiếu cam kết của lãnh đạo làm giảm mức độ ưu tiên; còn hạn chế về nguồn lực, dữ liệu hoặc cơ chế hợp đồng có thể khiến những yêu cầu đã được xác định vẫn khó thực hiện trong thực tế.

Các nghiên cứu trước thường nhận diện rào cản theo các nhóm như con người, tổ chức, tài chính, công nghệ và thể chế. Cách tiếp cận này giúp chỉ ra các điểm nghẽn nhưng chưa giải thích rõ vì sao một tổ chức có thể nhận thức được sự cần thiết của ESG mà vẫn khó chuyển thành hành động. Trong bối cảnh đó, mô hình SWITCH của Heath và Heath [10] cung cấp cách tiếp cận theo quản trị sự thay đổi với ba thành phần: định hướng nhận thức và hành động (Direct the Rider), tạo động lực và cam kết thay đổi (Motivate the Elephant), và định hình môi trường thực hiện (Shape the Path).

Trong bối cảnh BQLDA, định hướng nhận thức và hành động phản ánh mức độ hiểu biết về ESG, sự rõ ràng của hướng dẫn, khả năng xác định yêu cầu và phương pháp đo lường. Tạo động lực và cam kết thay đổi liên quan đến mức độ ưu tiên của lãnh đạo, sự sẵn sàng thay đổi cách quản lý và động lực của các bên tham gia. Định hình môi trường thực hiện tập trung vào những điều kiện như pháp lý, thủ tục dự án, đấu thầu, hợp đồng, tài chính, công nghệ, dữ liệu và cơ chế phối hợp. Theo cách này, rào cản ESG có thể xuất phát từ việc chưa rõ phải làm gì, chưa đủ động lực để thực hiện hoặc hệ thống quản lý chưa tạo điều kiện phù hợp.

Nghiên cứu này sử dụng SWITCH làm cơ sở để hệ thống hóa các rào cản được kế thừa từ nghiên cứu trước, thay vì xem ba thành phần của SWITCH là các rào cản có sẵn. Cách tiếp cận này vừa giữ được các bằng chứng về ESG và xây dựng bền vững, vừa tạo một logic chung để xem xét rào cản từ góc độ nhận thức, động lực và điều kiện thực hiện trong BQLDA.

2.2. Nhận dạng các nhóm rào cản thực hiện ESG tại BQLDA xây dựng

Từ tổng quan các nghiên cứu trước, các rào cản được nhận diện theo những vấn đề thường gặp trong quá trình thực hiện ESG, gồm nhận thức và kiến thức, năng lực nguồn nhân lực, cam kết của lãnh đạo, sự sẵn sàng thay đổi, pháp lý và thủ tục, nguồn lực tài chính, công nghệ, dữ liệu và phối hợp giữa các bên. Các nội dung này được đối chiếu với chức năng của BQLDA để tập trung vào những vấn đề có thể biểu hiện trong chuẩn bị dự án, thiết kế, lựa chọn nhà thầu, hợp đồng, giám sát và báo cáo.

Theo SWITCH, các rào cản được cấu trúc thành ba nhóm. Nhóm định hướng nhận thức và hành động (Direct the Rider) tập trung vào sự rõ ràng, kiến thức và năng lực thực hiện ESG. Nhóm tạo động lực và cam kết thay đổi (Motivate the Elephant) phản ánh mức độ ưu tiên của lãnh đạo, sự sẵn sàng thay đổi, cơ chế đánh giá và động lực của các bên tham gia. Nhóm định hình môi trường thực hiện (Shape the Path) bao gồm các điều kiện về pháp lý, thủ tục, đấu thầu, hợp đồng, kinh phí, công nghệ, dữ liệu và phối hợp. Cấu trúc này được sử dụng để hình thành danh mục rào cản ban đầu trước khi tiếp tục sàng lọc và hiệu chỉnh qua các vòng Delphi.

Bảng 1. Các nhóm rào cản và thuộc tính thực hiện ESG tại BQLDA xây dựng được nhận dạng từ các nghiên cứu trước

Nhóm rào cản	Rào cản/ thuộc tính	Mã biến	Nguồn tham khảo
Định hướng nhận thức và hành động	Cán bộ BQLDA chưa hiểu đầy đủ nội hàm và yêu cầu của ESG trong quản lý dự án xây dựng	RID1	[4, 5, 9]
	BQLDA thiếu hướng dẫn cụ thể để chuyển các nguyên tắc ESG thành yêu cầu quản lý dự án	RID2	
	BQLDA gặp khó khăn trong việc xác định các chỉ tiêu ESG phù hợp ở cấp độ dự án	RID3	[4, 5]
	BQLDA thiếu phương pháp và công cụ để đo lường, đánh giá các chỉ tiêu môi trường, xã hội và quản trị	RID4	
	Cán bộ BQLDA chưa được đào tạo đầy đủ về kiến thức và kỹ năng thực hiện ESG	RID5	[5, 6, 7]

Nhóm rào cản	Rào cản/ thuộc tính	Mã biến	Nguồn tham khảo
(Direct the Rider - RID)	BQLDA thiếu nhân sự có chuyên môn để triển khai và giám sát các yêu cầu ESG	RID6	
	Cán bộ BQLDA khó xác định vấn đề ESG trọng yếu đối với từng loại dự án	RID7	[4, 5]
	BQLDA thiếu kỹ năng tổng hợp, phân tích và báo cáo dữ liệu ESG	RID8	[4, 8, 14, 15]
Tạo động lực và cam kết thay đổi (Motivate the Elephant - ELEP)	Lãnh đạo BQLDA chưa xem ESG là một ưu tiên trong quản lý dự án	ELEP1	[4, 6, 8]
	ESG chưa được gắn với tiêu chí đánh giá kết quả thực hiện dự án	ELEP2	
	Chủ đầu tư chưa đặt ra yêu cầu rõ ràng về thực hiện ESG đối với BQLDA	ELEP3	[4, 8]
	Lãnh đạo BQLDA chưa phân bổ đủ nguồn lực để thúc đẩy thực hiện ESG	ELEP4	[4, 6, 8]
	BQLDA có xu hướng duy trì quy trình quản lý truyền thống, ít sẵn sàng thay đổi	ELEP5	[4, 5]
	Cán bộ BQLDA xem ESG là công việc bổ sung hơn là một phần của nhiệm vụ quản lý dự án	ELEP6	
	BQLDA lo ngại việc thực hiện ESG sẽ làm tăng khối lượng công việc và chi phí quản lý	ELEP7	[5, 6, 9]
	Nhà thầu, tư vấn và nhà thầu phụ thiếu động lực thực hiện ESG khi chưa gắn với lợi ích cụ thể	ELEP8	[4, 5]
Định hình môi trường thực hiện (Shape the Path - PATH)	Quy định pháp luật về ESG trong lĩnh vực xây dựng chưa đầy đủ và thống nhất	PATH1	[4, 5, 8, 13]
	Hồ sơ mời thầu chưa tích hợp các tiêu chí ESG để đánh giá năng lực nhà thầu	PATH2	[4, 5, 8]
	Điều khoản hợp đồng chưa quy định rõ trách nhiệm ESG của nhà thầu và tư vấn	PATH3	[4, 8]
	Thủ tục phê duyệt và điều chỉnh dự án đầu tư công còn hạn chế khả năng bổ sung yêu cầu ESG	PATH4	[13]
	BQLDA thiếu nguồn kinh phí để đầu tư cho các giải pháp và vật liệu thân thiện với môi trường	PATH5	[6, 7, 9]
	Chi phí thực hiện ESG chưa được dự toán đầy đủ trong tổng mức đầu tư của dự án	PATH6	
	BQLDA khó tiếp cận công nghệ carbon thấp và vật liệu xây dựng bền vững do hạn chế về chi phí	PATH7	
	BQLDA e ngại các yêu cầu ESG làm phát sinh chi phí ngoài kế hoạch của dự án	PATH8	
	BQLDA thiếu hệ thống dữ liệu và công cụ hỗ trợ thu thập, lưu trữ thông tin ESG	PATH9	[4, 8, 14, 15]
	Dữ liệu về môi trường, xã hội và quản trị của dự án còn phân tán, khó tổng hợp	PATH10	
	BQLDA thiếu cơ chế kiểm tra, xác nhận độ tin cậy của thông tin ESG do nhà thầu cung cấp	PATH11	
	Cơ chế phối hợp và chia sẻ thông tin ESG giữa chủ đầu tư, BQLDA, tư vấn và nhà thầu chưa hiệu quả	PATH12	

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu gồm hai giai đoạn. Giai đoạn đầu rà soát tài liệu về ESG, xây dựng bền vững, QLDA và các rào cản thực hiện ESG để xác định khoảng trống và xây dựng danh mục ban đầu. Các rào cản được đối chiếu với chức năng BQLDA và cấu trúc theo ba thành phần của SWITCH: định hướng nhận thức và hành động, tạo động lực và cam kết thay đổi, và định hình môi trường thực hiện. Kết quả hình thành 28 rào cản ban đầu làm đầu vào cho đánh giá chuyên gia (Bảng 1).

Giai đoạn thứ hai sử dụng phỏng vấn Delphi bán cấu trúc qua nhiều vòng nhằm đánh giá mức độ phù hợp, hiệu chỉnh cách diễn đạt và sàng lọc các rào cản theo điều kiện thực tế của BQLDAXD. Ý kiến chuyên gia được thu thập và tổng hợp ẩn danh sau mỗi vòng, sau đó đánh giá theo quy tắc KAMET kế thừa từ Nguyen và Luu [11], với ba chỉ số gồm giá trị trung bình M_{qi}, độ lệch tứ phân vị Q_{qi} và chỉ số phân tán V_{qi}:

$$M_{qi} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \quad (1)$$

$$Q_{qi} = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2} \quad (2)$$

$$V_{qi} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(x_{ki} - \bar{X}_i)^2}{n-1} \times 100\% \quad (3)$$

Trong đó, q_i là rào cản được đánh giá, n là số chuyên gia, x_{ki} là điểm đánh giá của chuyên gia thứ kđối với rào cản q_i, $\bar{X}_i$ là giá trị trung bình, còn Q_1và Q_3lần lượt là tứ phân vị 25% và 75%. Chỉ số V_{qi} phản ánh mức độ phân tán của các đánh giá quanh giá trị trung bình. Một rào cản được chấp nhận khi đồng thời đạt $M_{qi} \geq 3.5$, $Q_{qi} \leq 0.5$ và $V_{qi} \leq 15\%$. Những rào cản chưa đạt đồng thuận được tiếp tục đánh giá ở vòng Delphi sau. Quá trình kết thúc khi các rào cản còn lại đáp ứng các tiêu chí đồng thuận, qua đó hình thành khung đánh giá rào cản thực hiện ESG tại BQLDA và làm cơ sở cho kiểm định định lượng ở giai đoạn tiếp theo.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Đặc điểm của các chuyên gia tham gia phỏng vấn bán cấu trúc bằng phương pháp Delphi

Nghiên cứu lựa chọn chuyên gia có chủ đích, ưu tiên người đang làm việc tại các tỉnh, thành phố phía Nam, có ít nhất 10 năm kinh nghiệm và liên quan trực tiếp đến quản lý hoặc hỗ trợ thực hiện dự án xây dựng. Trong 26 người được mời, 15 chuyên gia tham gia (57.69%), gồm 11 nhân sự BQLDA, 2 đại diện nhà cung cấp, 01 giảng viên đại học và 01 cán bộ khu vực công. Về thâm niên, 4 người có trên 10 năm, 6 người trên 15 năm và 5 người trên 20 năm kinh nghiệm.

Quá trình Delphi được thực hiện ẩn danh. Sau mỗi vòng, kết quả được gửi lại cho chuyên gia trước vòng tiếp theo để xem xét, điều chỉnh đánh giá khi cần, qua đó duy trì tính độc lập và thúc đẩy sự hội tụ ý kiến.

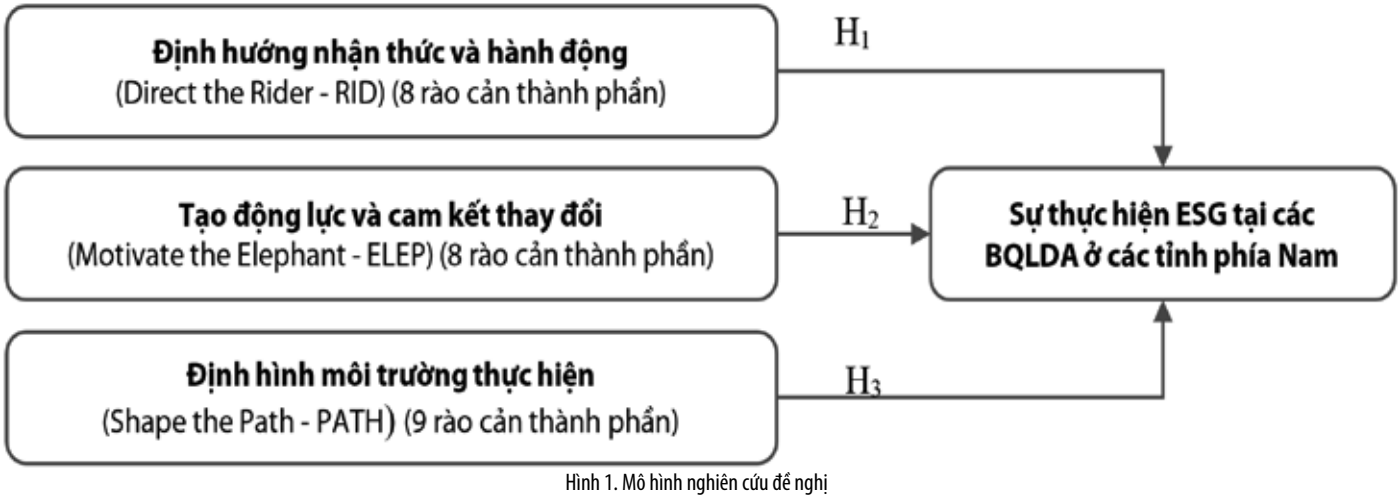
4.2. Kết quả các vòng Delphi

Sau ba vòng Delphi, 25/28 rào cản được giữ lại và đạt sự đồng thuận theo các tiêu chí KAMET.

Ba rào cản bị loại đều thuộc nhóm *Shape the Path*, gồm PATH7 - khó tiếp cận công nghệ carbon thấp và vật liệu xây dựng bền vững do hạn chế về chi phí; PATH8 - lo ngại yêu cầu ESG làm phát sinh chi phí ngoài kế hoạch; và PATH10 - dữ liệu ESG của dự án còn phân tán, khó tổng hợp. Cả ba không đáp ứng đầy đủ các ngưỡng KAMET, chủ yếu do $M_{qi} < 3.5$ở vòng đánh giá cuối tương ứng. Bảng 2 tổng hợp kết quả qua ba vòng; từ 25 rào cản được chấp nhận, khung SWITCH sau Delphi được trình bày ở Hình 1, gồm 8 rào cản thuộc Direct the Rider, 8 thuộc Motivate the Elephant và 9 thuộc Shape the Path.

Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả phỏng vấn chuyên gia sử dụng phương pháp Delphi qua ba vòng

Mã thuộc tính	Delphi vòng 1			Delphi vòng 2			Delphi vòng 3			Kết quả cuối cùng
	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	
RID2	5.00	0.00	0.00%							Chấp nhận vì đạt đồng thuận khả thi (vòng 1)
RID3	3.87	0.00	12.38%							
RID4	4.13	0.00	12.38%							
RID5	4.00	0.00	14.29%							
ELEP1	4.00	0.00	14.29%							
PATH1	3.93	0.00	6.67%							
PATH2	4.93	0.00	6.67%							
PATH3	4.93	0.00	6.67%							
PATH9	4.87	0.00	12.38%							
PATH12	4.07	0.00	6.67%							
PATH7	2.87	0.00	12.38%							Loại vì đạt đồng thuận không khả thi (vòng 1)
RID1	4.27	0.00	20.95%	4.13	0.00	12.38%				Chấp nhận vì đạt đồng thuận khả thi (vòng 2)
RID7	3.93	0.00	20.95%	3.87	0.00	12.38%				
RID8	3.93	0.00	20.95%	3.87	0.00	12.38%				
ELEP4	3.93	0.00	20.95%	3.93	0.00	6.67%				
ELEP5	4.07	0.00	35.24%	4.00	0.00	14.29%				
ELEP8	4.00	0.00	28.57%	4.00	0.00	14.29%				
PATH11	4.00	0.00	28.57%	4.00	0.00	14.29%				
PATH8	3.13	0.00	26.67%	3.13	0.00	12.38%				Loại vì đạt đồng thuận không khả thi (vòng 2)
RID6	3.73	0.25	20.95%	3.80	0.00	17.14%	3.87	0.00	12.38%	Chấp nhận vì đạt đồng thuận khả thi (vòng 3)
ELEP2	3.87	0.00	26.67%	3.80	0.00	17.14%	3.87	0.00	12.38%	
ELEP3	3.67	0.50	38.10%	3.67	0.50	23.81%	3.87	0.00	12.38%	
ELEP6	3.47	0.50	26.67%	3.73	0.25	20.95%	4.00	0.00	14.29%	
ELEP7	3.53	0.50	26.67%	3.73	0.25	20.95%	4.00	0.00	14.29%	
PATH4	3.60	0.50	25.71%	3.67	0.50	23.81%	3.87	0.00	12.38%	
PATH5	3.53	0.50	26.67%	3.60	0.50	25.71%	3.87	0.00	12.38%	
PATH6	3.80	0.00	17.14%	3.80	0.00	17.14%	3.87	0.00	12.38%	
PATH10	3.40	0.50	40.00%	3.27	0.50	35.24%	3.13	0.00	12.38%	Loại vì đạt đồng thuận không khả thi (vòng 3)



Hình 1. Mô hình nghiên cứu đề nghị

5. THẢO LUẬN, KHUYẾN NGHỊ

5.1. Thảo luận

Sau ba vòng Delphi, 25/28 rào cản đạt đồng thuận theo KAMET, gồm 8 rào cản thuộc *Direct the Rider*, 8 thuộc *Motivate the Elephant* và 9 thuộc *Shape the Path*. Một số rào cản đạt mức đánh giá rất cao ngay từ vòng đầu, nổi bật là RID2 - thiếu hướng dẫn cụ thể để chuyển ESG thành yêu cầu quản lý dự án ($M_{qi} = 5.000$); PATH2 và PATH3 - thiếu tiêu chí ESG trong hồ sơ mời thầu và trách nhiệm ESG trong hợp đồng (cùng $M_{qi} = 4.933$); PATH9 - thiếu hệ thống dữ liệu và công cụ hỗ trợ ESG ($M_{qi} = 4.867$). Điều này cho thấy điểm nghẽn đáng chú ý nằm ở khả năng chuyển ESG từ nguyên tắc chung thành yêu cầu quản lý cụ thể.

Ba rào cản bị loại là PATH7, PATH8 và PATH10. Kết quả này cho thấy chuyên gia đồng thuận cao hơn với những rào cản có phạm vi rõ và gắn trực tiếp với chức năng BQLDA. Nhìn chung, thực hiện ESG chịu ảnh hưởng đồng thời bởi nhận thức, động lực thay đổi và các điều kiện hỗ trợ về quy trình, hợp đồng, nguồn lực, dữ liệu và phối hợp.

5.2. Khuyến nghị

BQLDA cần ưu tiên cụ thể hóa ESG thành hướng dẫn, chỉ tiêu, phương pháp đánh giá và nội dung đào tạo phù hợp; đồng thời tăng vai trò của lãnh đạo trong phân bổ nguồn lực và gắn ESG với kết quả thực hiện dự án. Các yêu cầu ESG cũng nên được đưa vào hồ sơ mời thầu, hợp đồng, cơ chế kiểm tra thông tin và quy trình phối hợp giữa các bên.

Khung SWITCH có thể dùng như công cụ rà soát ban đầu để xác định rào cản nằm ở nhận thức, động lực hay điều kiện thực hiện, từ đó lựa chọn biện pháp xử lý phù hợp với từng BQLDA.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tổng hợp 28 rào cản thực hiện ESG tại BQLDA và cấu trúc theo ba thành phần của SWITCH. Qua ba vòng Delphi với 15 chuyên gia và sàng lọc theo KAMET, 25 rào cản được giữ lại; PATH7, PATH8 và PATH10 bị loại.

Kết quả hình thành khung đánh giá rào cản gắn với hoạt động thực tế của BQLDA. Tuy nhiên, nghiên cứu mới phản ánh sự đồng thuận của chuyên gia tại các tỉnh, thành phố phía Nam; bước tiếp theo cần kiểm định trên mẫu lớn hơn và đánh giá mức độ tác động của từng nhóm rào cản đến thực hiện ESG.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Khoa Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. T. Tan, Đ. T. Sỹ, N. T. Việt. Rào cản trong việc triển khai kinh tế tuần hoàn vào ngành xây dựng tại Việt Nam. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, Bộ Xây dựng, tập 14, số 06, tr. 98-104, 2024, doi: 10.54772/jomc.06.2024.799.

[2] L. M. L. Nguyen and T. V. Luu. Designing a system dynamics model for contractors' sustainable productivity management: Integrating the balanced scorecard perspectives with empirical evidence. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, pp. 1-21, 2026 (advance online publication), doi: 10.1080/13467581.2026.2700079.

[3] G. Friede, T. Busch and A. Bassen. ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. Journal of Sustainable Finance & Investment, vol. 5, no. 4, pp. 210-233, 2015, doi: 10.1080/20430795.2015.1118917.

[4] R. O. Asiedu, A. B. Amoakwa, D. G. Owusu-Manu, D. J. Edwards, S. Gyimah and C. Ameyaw. Barriers to the integration of environmental, social and governance (ESG) considerations in the Ghanaian construction industry. Construction Innovation, 2025 (advance online publication), doi: 10.1108/CI-03-2025-0098.

[5] A. M. Ahmed, W. Sayed, A. Asran and I. Nosier. Identifying barriers to the implementation and development of sustainable construction. International Journal of Construction Management, vol. 23, no. 8, pp. 1277-1288, 2023, doi: 10.1080/15623599.2021.1967577.

[6] H.-T. Nguyen, M. Skitmore, M. Gray, X. Zhang and A. O. Olanipekun. Will green building development take off? An exploratory study of barriers to green building in Vietnam. Resources, Conservation and Recycling, vol. 127, pp. 8-20, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.012.

[7] Q. Tran et al. Empirical examination of factors influencing the adoption of green building technologies: The perspective of construction developers in developing economies. Sustainability, vol. 12, no. 19, art. no. 8067, 2020, doi: 10.3390/su12198067.

[8] R. O. Asiedu, A. B. Amoakwa, C. Ameyaw, P. Daniels, D.-G. Owusu-Manu and S. Gyimah. Environmental, social and governance (ESG) considerations in sustainable project delivery in the construction industry. Construction Economics and Building, vol. 26, no. 2, 2026, doi: 10.5130/rzg8rc16.

[9] A. Darko and A. P. C. Chan. Review of barriers to green building adoption. Sustainable Development, vol. 25, no. 3, pp. 167-179, 2017, doi: 10.1002/sd.1651.

[10] C. Heath and D. Heath. Switch: How to change things when change is hard. New York, NY, USA: Broadway Books, 2010.

[11] L. M. L. Nguyen and T. V. Luu. Evaluating of attributes affecting contractors' sustainability productivity management in developing countries based on the balanced scorecard perspectives. International Journal of Construction Management, vol. 25, no. 15, pp. 1834-1846, 2025, doi: 10.1080/15623599.2025.2485166.

[12] L. M. L. Nguyễn, T. V. Lưu. Phát triển mô hình khái niệm cho thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường: Một nghiên cứu Delphi. Tạp chí Xây dựng, số 5, tr. 229-234, 2026. Internet: https://tapchixaydung.vn/tap-chi-xay-dung-so-05-2026-20201224000038227.html#page/230 (truy cập: tháng 9/2026).

[13] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10 tháng 12 năm 2025. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?classid=1&docid=216514&orggroupid=1&pageid=27160 (truy cập: tháng 9/2026).

[14] Principles for Responsible Investment. ESG integration in listed equity: A technical guide. Apr. 18, 2023. Internet: https://public.unpri.org/esg-integration-in-listed-equity-a-technical-guide/11273.article (accessed: 9/2026).

[15] World Bank. World Bank relaunches Sovereign ESG Data Portal. Dec. 12, 2022. Internet: https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/12/12/world-bank-relaunches-sovereign-esg-data-portal (accessed: 9/2026).

■Ngày nhận bài: 05/10/2026 ■Ngày sửa bài: 15/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/10/2026

Định giá dự án BOT hạ tầng đang vận hành: Nghiên cứu trường hợp dự án BOT cầu Cổ Chiên

Valuation of an operational infrastructure BOT project: A case study of the Co Chien bridge bot project

> TS THÂN TRỌNG TRẦN HOAN[1], THS PHẠM TRƯỜNG GIANG[1,*], THS PHẠM TRƯỜNG VŨ[2], THS NGUYỄN DUY CƯỜNG[1], THS BÙI MINH NGỌC TRUNG[3]

[1]Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn

[2]Bộ Xây dựng

[3]Công ty Cổ phần Tôn Pomina

[*]Email: giang.phamtruong@stu.edu.vn

TÓM TẮT

Nhiều dự án hạ tầng giao thông BOT hiện đã đi vào khai thác ổn định với dòng thu phí dễ dự báo, dẫn đến nhu cầu chuyển nhượng quyền khai thác, thoái vốn hoặc chứng khoán hóa để thu hồi vốn tái đầu tư. Điều kiện tiên quyết cho các giao dịch này là phải xác định chính xác giá trị dự án tại thời điểm thực hiện. Bài báo trình bày hai phương pháp thẩm định giá dự án BOT hạ tầng đang hoạt động là phương pháp chi phí và phương pháp thu nhập. Trong đó, giá trị dự án theo phương pháp thu nhập bằng giá trị quyết toán vốn đầu tư trừ hao mòn lũy kế, cộng giá trị hiện tại thuần (NPV) của dòng tiền khai thác còn lại. Các phương pháp được áp dụng tính toán thực tế cho phần cầu chính thuộc Dự án BOT cầu Cổ Chiên (quốc lộ 60) tại thời điểm tháng 12/2022. Kết quả cho thấy giá trị quyết toán vốn đầu tư là 818,873 tỷ đồng, hao mòn lũy kế là 43,398 tỷ đồng và NPV đạt 364,000 tỷ đồng. Do đó, giá trị dự án theo phương pháp thu nhập đạt khoảng 1.139,475 tỷ đồng, so với giá trị còn lại theo phương pháp chi phí là 775,475 tỷ đồng. Khoảng giá trị này là cơ sở để các bên thương lượng khi chuyển nhượng quyền khai thác hoặc định giá cổ phần trước khi chào bán ra công chúng. Bài báo cũng chỉ ra các yếu tố rủi ro chi phối kết quả và đề xuất các kiến nghị về khung pháp lý cũng như phương pháp luận thẩm định giá.

Từ khóa: Định giá dự án; phương pháp định giá; NPV; quản trị rủi ro; lãi suất chiết khấu; đầu tư công; kinh tế xây dựng; quản lý xây dựng; thị trường chứng khoán (HSX/HNX).

ABSTRACT

Many BOT transport infrastructure projects have entered stable operation with predictable toll revenue streams, leading to the demand for transferring operating rights, divesting capital, or securitizing assets to recover capital for reinvestment. A prerequisite for these transactions is the accurate determination of the project value at the valuation date. This paper presents two valuation methods for operational BOT infrastructure projects: the cost approach and the income approach. Under the income approach, the project value equals the finalized investment capital minus accumulated depreciation, plus the net present value (NPV) of the remaining operational cash flows. These methods were applied to practical calculations for the main bridge section of the Co Chien Bridge BOT Project on National Highway 60 as of December 2022. The results show that the finalized investment capital was VND 818.873 billion, accumulated depreciation was VND 43.398 billion, and the NPV reached VND 364.000 billion. Consequently, the project value under the income approach reached approximately VND 1,139.475 billion, compared to the residual value under the cost approach of VND 775.475 billion. This valuation range serves as a baseline for negotiations during operating rights transfers or equity valuation prior to a public offering. In addition, the paper highlights key risk factors influencing valuation outcomes and proposes recommendations for both the legal framework and valuation methodology.

Keywords: Project valuation; valuation methods; NPV; risk management; discount rate; public investment; construction e conomics; construction management; stock market (HSX/HNX).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiều dự án đầu tư hạ tầng tại Việt Nam, bao gồm các dự án theo phương thức BOT, đã được chứng khoán hóa [1]. Một số doanh nghiệp đã niêm yết trên thị trường chứng khoán như các mã SJD [2], PPC, HND, QTP. Bên cạnh đó, hàng loạt dự án BOT đã được bên thứ ba cam kết bảo đảm trả nợ ngân hàng.

Các dự án BOT thường có vòng đời dài. Trong khi đó, khả năng thu hồi vốn từ nguồn thu phí luôn là một biến số bất định. Vì vậy, để giảm thiểu rủi ro và thoái vốn, chủ đầu tư cùng cơ quan quản lý đứng trước hai lựa chọn: tiếp tục giữ công trình để thu phí, hoặc chuyển nhượng quyền khai thác cho nhà đầu tư khác [3, 4].

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy giá trị của quyền khai thác phụ thuộc chặt chẽ vào cách phân bổ rủi ro giữa Nhà nước và nhà đầu tư. Tại Pháp, năm 2006 Nhà nước đã bán toàn bộ phần vốn nắm giữ trong các công ty nhượng quyền cao tốc (trong đó có các công ty khai thác trục A6 và A7) cho các tập đoàn tư nhân; về sau Cour des comptes nhận định quan hệ giữa Nhà nước và các công ty này thiếu cân bằng và thiếu minh bạch [5]. Tại Tây Ban Nha, việc chuyển phần lớn rủi ro lưu lượng, giải phóng mặt bằng và tài chính sang khu vực tư nhân đã bộc lộ nhiều bất cập khi suy thoái kinh tế làm lưu lượng xe giảm mạnh hơn nhiều so với GDP [6]. Ở góc độ định lượng, Ashuri và cộng sự. [7] đề xuất đánh giá dự án BOT cao tốc có quyền chọn bảo đảm doanh thu tối thiểu của Nhà nước bằng phương pháp định giá phi rủi ro (risk-neutral pricing), nhằm phản ánh tính bất định của lưu lượng mà phân tích NPV truyền thống chưa xử lý được.

Việc định giá các dự án BOT đang hoạt động hiệu quả là ưu tiên hàng đầu trước khi chứng khoán hóa ra công chúng [1]. Nguyên nhân là do giá chào bán cổ phần hay giá chuyển nhượng chỉ có cơ sở vững chắc khi giá trị dự án được xác định khoa học và minh bạch. Yêu cầu này càng trở nên cấp thiết khi Nghị quyết số 68-NQ/TW [8] của Bộ Chính trị đã đặt nhiệm vụ nghiên cứu xây dựng khung pháp lý về chứng khoán hóa các khoản nợ.

Tuy nhiên, công trình hạ tầng giao thông là loại tài sản đặc thù với vòng đời kéo dài. Thị trường hiện có rất ít giao dịch tương tự để so sánh trực tiếp. Do đó, việc định giá bắt buộc phải dựa vào chi phí đầu tư đã bỏ ra kết hợp với các lợi ích dự kiến thu được trong tương lai [3, 9].

Bài báo này trình bày 02 phương pháp định giá áp dụng cho dự án BOT đang hoạt động. Đồng thời, nghiên cứu đưa ra một trường hợp điển hình đối với dự án BOT Cầu Cổ Chiên. Nội dung bài báo được tổ chức thành ba phần chính:

- Mục 2: Phương pháp thẩm định giá.
- Mục 3: Nghiên cứu điển hình dự án BOT cầu Cổ Chiên (gồm giới thiệu dự án, các giá trị tính đến tháng 12/2022, kết quả định giá và bình luận).
- Mục 4: Kết luận và kiến nghị.

Bài báo đóng góp 02 phương pháp định giá từ học thuật đến ứng dụng vào dự án đang hoạt động hiệu quả để làm cơ sở cho các mục tiêu quan trọng của Chủ đầu tư như: Chứng khoán nợ, Bảo lãnh cho các dự án BOT khác. Đặc biệt, bài báo cũng cung cấp thêm một góc nhìn khác về Quản trị rủi ro đầu tư xây dựng.

2. PHƯƠNG PHÁP THẨM ĐỊNH GIÁ

2.1. Giới thiệu về thẩm định giá

Thẩm định giá là việc xác định giá trị tài sản bằng tiền tại một thời điểm nhất định. Đây là hoạt động chuyên môn mang tính kinh tế - kỹ thuật, đồng thời có tính pháp lý và xã hội [3, 10]. Khi không có thị trường tương đồng để so sánh, người thẩm định giá phải dựa vào các cơ sở phi thị trường. Vì vậy, thẩm định giá thường được mô tả là một "khoa học không chính xác". Hoạt động này mang tính khoa học vì dựa trên phân tích và tính toán. Tuy nhiên, kết quả chỉ là ý kiến chuyên môn cho đến khi giao dịch thực sự diễn ra [4].

Các phương pháp thẩm định giá phổ biến gồm: so sánh trực tiếp, thu nhập, chi phí, thặng dư và lợi nhuận [11]. Đối với công trình hạ tầng giao thông đang khai thác, phương pháp so sánh trực tiếp rất khó áp dụng do thiếu các tài sản tương tự đã giao dịch thành công. Trong khi đó, phương pháp thặng dư và lợi nhuận chủ yếu gắn với phát triển bất động sản hoặc hoạt động kinh doanh thông thường. Do đó, bài báo tập trung vào hai phương pháp chính: phương pháp chi phí và phương pháp thu nhập. Hai phương pháp này tương ứng với cách tiếp cận từ chi phí và cách tiếp cận từ thu nhập trong hệ thống tiêu chuẩn thẩm định giá [4, 12].

Quy trình thẩm định giá gồm 06 bước cơ bản:

Bước 1: Xác định tổng quát về tài sản và loại hình giá trị.

Bước 2: Lập kế hoạch thẩm định giá.

Bước 3: Khảo sát hiện trường và thu thập thông tin.

Bước 4: Phân tích thông tin.

Bước 5: Xác định giá trị tài sản.

Bước 6: Lập báo cáo và chứng thư thẩm định giá.

Kết quả thẩm định giá chịu tác động từ hai nhóm yếu tố [3]:

- Yếu tố khách quan: Chính sách pháp luật và quan hệ cung cầu.
- Yếu tố chủ quan: Năng lực, đạo đức của thẩm định viên, nguồn thông tin và phương pháp áp dụng.

Vì vậy, nghiên cứu điển hình ở mục 3 chỉ sử dụng các số liệu có nguồn gốc rõ ràng. Các dữ liệu này được trích xuất từ quyết toán vốn đầu tư và phương án tài chính đã được cơ quan có thẩm quyền phê duyệt.

2.2. Phương pháp chi phí

Phương pháp chi phí ước tính giá trị tài sản bằng chi phí tạo ra tài sản đó, sau khi đã trừ đi phần giá trị hao mòn [10, 12].

Giá của công trình được xác định theo công thức:

$$G_{\mathrm{CP}} = G_{\mathrm{XDM}} - G_{\mathrm{HMLK}} \quad (1)$$

Trong đó:

- G_{CP}: Giá trị tài sản xác định theo phương pháp chi phí;
- G_{XDM}: Chi phí xây dựng mới công trình;
- G_{HMLK}: Giá trị hao mòn lũy kế (tính đến thời điểm thẩm định giá).

Phương pháp chi phí phản ánh giá trị còn lại của khoản vốn đã đầu tư. Tuy nhiên, phương pháp này chưa tính đến khả năng sinh lời của công trình trong tương lai. Vì vậy, kết quả thường được sử dụng làm mức giá sàn (cận dưới) khi các bên thương lượng giá trị chuyển nhượng.

2.3. Phương pháp thu nhập

Phương pháp thu nhập ước tính giá trị tài sản dựa trên các khoản thu nhập tài sản mang lại trong tương lai. Các khoản thu nhập này được quy đổi về thời điểm thẩm định giá [10]. Đối với dự án BOT đang hoạt động, giá trị dự án được xác định theo công thức:

$$G_{\mathrm{TN}} = G_{\mathrm{QTV}} - G_{\mathrm{HMLK}} + G_{\mathrm{HTT}} \quad (2)$$

Trong đó:

- G_{TN}: Giá trị tài sản xác định bằng phương pháp thu nhập;
- G_{QTV}: Giá trị quyết toán vốn đầu tư;
- G_{HMLK}: Giá trị hao mòn lũy kế tính đến thời điểm thẩm định giá;
- G_{HTT}: Giá trị hiện tại thuần (NPV) của dòng tiền khai thác còn lại.

Nói cách khác, giá trị dự án G_{TN} bằng giá trị còn lại của khoản vốn đã đầu tư (G_{QTV} - G_{HMLK}) cộng với phần giá trị kinh tế tăng thêm do dòng tiền khai thác tạo ra (G_{HTT}).

Các thành phần trên được xác định cụ thể như sau:

2.3.1. Giá trị quyết toán vốn:

Giá trị quyết toán vốn là toàn bộ chi phí hợp pháp đã thực hiện để đưa dự án vào khai thác và sử dụng [3,11]:

$$G_{\mathrm{QTV}} = G_{\mathrm{BT,TĐC}} + G_{\mathrm{XD}} + G_{\mathrm{TB}} + G_{\mathrm{QLDA}} + G_{\mathrm{TV}} + G_{\mathrm{K}} \quad (3)$$

Trong đó:

- G_{QTV}: giá trị quyết toán vốn đầu tư;
- $G_{BT,TĐC}$: chi phí bồi thường, hỗ trợ và tái định cư;
- G_{XD}: chi phí xây dựng;
- G_{TB}: chi phí thiết bị;
- G_{QLDA}: chi phí quản lý dự án;
- G_{TV}: chi phí tư vấn đầu tư xây dựng;
- G_K: chi phí khác.

2.3.2. Giá trị hao mòn lũy kế:

Giá trị hao mòn lũy kế được xác định theo phương pháp tuổi đời, gắn liền với hao mòn vật lý của công trình [3, 11]:

$$G_{\mathrm{HMLK}} = T_{\mathrm{LHM}} \times G_{\mathrm{XD}} \quad (4)$$

Trong đó, tỷ lệ hao mòn T_{LHM} là tỷ số giữa tuổi đời hiệu quả và tuổi đời kinh tế của công trình [3, 11]:

$$T_{\mathrm{LHM}} = \frac{\text{Tuổi đời hiệu quả}}{\text{Tuổi đời kinh tế}} \times 100\% \quad (5)$$

2.3.3. Giá trị hiện tại thuần (GHTT hay còn được gọi là NPV):

Giá trị hiện tại thuần là hiệu số giữa thu và chi của dự án được quy về thời điểm định giá. Chỉ số này dùng để đánh giá hiệu quả tài chính [3, 9]:

$$G_{\mathrm{HTT}} = \mathrm{NPV} = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} = -V + \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

Trong đó:

- V: Vốn đầu tư tại thời điểm định giá được xác định bằng tổng chi phí đầu tư bao gồm cả chi phí vận hành/khai thác khấu trừ các khoản phải thu từ khi đầu tư xây dựng đến thời điểm định giá;
- B_t: Khoản thu năm thứ t tính từ thời điểm định giá;
- C_t: Khoản chi vận hành/khai thác năm thứ t tính từ thời điểm định giá;
- n: Tuổi thọ kinh tế còn lại của công trình;
- i: Tỷ suất chiết khấu.

Xác định Doanh thu và Chi phí:

• Doanh thu (Bt): Nguồn thu chủ yếu đến từ phí giao thông. Nguồn thu này phụ thuộc vào hai yếu tố chính: lưu lượng xe từng loại và biểu mức thu phí. Lưu lượng xe được đếm trực tiếp và quay phim ghi hình (15 phút/giờ tại nhiều thời điểm trong ngày). Mức phí do Bộ Tài chính quy định chi tiết [3]. Ngoài ra, nguồn thu từ khai thác hành lang an toàn (cho thuê quảng cáo, trạm dừng nghỉ, xăng dầu...) được tạm tính bằng 0,25% doanh thu thu phí [3].

• Chi phí (C_t): Gồm chi phí duy tu bảo dưỡng (thường xuyên, vừa và lớn), chi phí vận hành (quản lý, thu phí, tuần đường) và chi phí điện chiếu sáng.

2.3.4. Tỷ suất chiết khấu:

Tỷ suất chiết khấu được xác định bằng chi phí sử dụng vốn bình quân (WACC) [3, 9, 11]:

$$i = \mathrm{WACC} = R_e W_e + R_d W_d \quad (7)$$

Trong đó:

- R_e: Lãi suất kỳ vọng của chủ đầu tư hoặc Nhà nước;
- W_e: Tỷ trọng vốn chủ sở hữu (hoặc vốn Nhà nước) trong tổng vốn đầu tư;
- R_d: Chi phí lãi vay thương mại tại thời điểm định giá;
- W_d: Tỷ trọng vốn vay trong tổng vốn đầu tư ($W_e + W_d = 1$)

2.3.5. Quy trình định giá 5 bước:

Tóm lại, quy trình thẩm định giá theo phương pháp thu nhập gồm 05 bước nối tiếp nhau như Hình 1.

Bước 1 Xác định giá trị quyết toán vốn đầu tư G_{QTV} → **Bước 2** Ước tính hao mòn lũy kế G_{HMLK} → **Bước 3** Ước tính doanh thu, chi phí khai thác và thu nhập ròng → **Bước 4** Xác định tỷ suất chiết khấu i (WACC) → **Bước 5** Tính NPV và xác định giá G_{TN}

Hình 1. Quy trình định giá dự án BOT đang hoạt động theo phương pháp thu nhập

Bảng 1. Thông tin cơ bản về Dự án thành phần 1 - phần cầu chính

Chỉ tiêu	Nội dung
Tên dự án	Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên, quốc lộ 60 (tỉnh Trà Vinh - Bến Tre)
Hình thức đầu tư	BOT; cơ quan nhà nước có thẩm quyền: Bộ Giao thông vận tải [13]
Nhà đầu tư	Liên danh Tổng công ty Xây dựng công trình giao thông 1 - CTCP và Công ty cổ phần Đầu tư xây dựng Tuấn Lộc, theo Hợp đồng số 40/BOT-BGTVT ngày 08/8/2014 [14]
Phạm vi, quy mô	Km9+695,4 - Km11+294,6; chiều dài 1,599 km
Tiêu chuẩn kỹ thuật	Đường cấp III đồng bằng; tốc độ thiết kế 80 km/h (vận tốc sử dụng 60 km/h)
Tư vấn thiết kế	Tổng Công ty Tư vấn thiết kế giao thông vận tải (TEDI)
Thu phí	01 trạm thu phí, thu phí dừng và không dừng; biểu mức thu phí theo Thông tư 136/2015/TT-BTC [15]
Thời gian xây dựng	2013 - 2015; hoàn thành theo thực tế năm 2016 [3]

3. NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH (CẦU CỔ CHIÊN)

3.1. Giới thiệu dự án

Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên nằm trên quốc lộ 60, nối liền hai tỉnh Bến Tre và Trà Vinh. Công trình nằm trong hệ thống các cầu lớn trên quốc lộ 60, cùng với cầu Rạch Miễu và cầu Hàm Luông. Dự án tạo kết nối trực tiếp giữa quốc lộ 60 và quốc lộ 1A. Qua đó, công trình giúp giảm áp lực giao thông cho quốc lộ 1A, đồng thời thúc đẩy phát triển kinh tế – xã hội vùng Đồng bằng sông Cửu Long [3].

Dự án được tách thành hai dự án thành phần [13]:

• Dự án thành phần 1 (Phần cầu chính):

Thực hiện theo hình thức hợp đồng BOT bằng vốn của nhà đầu tư. Phạm vi xây dựng từ Km9+695,4 đến Km11+294,6 với tổng chiều dài là 1,599 km.

• Dự án thành phần 2 (Đường dẫn phía Bến Tre, Trà Vinh và các cầu trên đường dẫn):

Đầu tư bằng nguồn ngân sách trung ương. Bộ Giao thông vận tải làm chủ đầu tư và Ban Quản lý dự án 7 trực tiếp quản lý. Tổng chiều dài đoạn này là 14,161 km (không bao gồm cầu Cổ Chiên). Thông tin cơ bản của Dự án thành phần 1 được tóm tắt tại Bảng 1.

3.2. Các giá trị tính đến tháng 12/2022

Thời điểm định giá dự án được xác định là tháng 12/2022. Các số liệu khảo sát và thu thập được lấy trong ba năm (2019, 2020, 2021) [3]. Hợp đồng BOT chỉ lập và phê duyệt phương án tài chính cho phần cầu chính. Do đó, phạm vi định giá được giới hạn trong phần cầu chính thuộc Dự án thành phần 1.

3.2.1. Giá trị quyết toán vốn đầu tư

Bộ Giao thông vận tải đã ban hành các văn bản thỏa thuận giá trị quyết toán phần vốn BOT [16,17]. Sau khi đối chiếu với kết quả kiểm toán, giá trị quyết toán vốn đầu tư của phần cầu chính (tính theo công thức 3) đạt G_{QTV} = 818,873 tỷ đồng.

Trong đó:

• Chi phí xây dựng G_{XD} = 723,300 tỷ đồng

• Các khoản chi phí còn lại (bồi thường, quản lý dự án, tư vấn, chi phí khác) là 95,573 tỷ đồng [3].

3.2.2. Giá trị hao mòn lũy kế

Giá trị hao mòn lũy kế được tính theo phương pháp tuổi đời, dựa trên hướng dẫn tại Tiêu chuẩn thẩm định giá Việt Nam về cách tiếp cận từ chi phí [11]. Công trình cầu được xem là công trình vĩnh cửu với tuổi đời kinh tế tính bằng 100 năm. Công trình hoàn thành thực tế vào năm 2016. Do đó, tại thời điểm định giá (tháng 12/2022), tuổi đời hiệu quả của cầu là 6 năm và tuổi đời kinh tế còn lại là 94 năm [3].

Chi tiết thông số và kết quả tính toán được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Xác định hao mòn lũy kế của phần cầu chính

Thông số	**Giá trị**
Tuổi đời kinh tế	100 năm
Tuổi đời hiệu quả	6 năm
Tuổi đời kinh tế còn lại	94 năm
Chi phí xây dựng G_{XD}	723,300 tỷ đồng
Tỷ lệ hao mòn T_{LHM} = 6/100	6%
Hao mòn lũy kế G_{HMLK} = 6% × 723,300	**43,398 tỷ đồng**

3.2.3. Giá trị hiện tại thuần (NPV)

Doanh thu dự án được xác định dựa trên phương án tài chính đã được Bộ Giao thông vận tải phê duyệt. Dự án vận hành 01 trạm thu phí với hai hình thức: thu phí dừng và không dừng.

• Nguồn thu:

Doanh thu tính từ dự báo lưu lượng xe, thành phần dòng xe và biểu mức thu phí giai đoạn 2017 - 2046. Tốc độ tăng trưởng lưu lượng xe căn cứ vào tốc độ tăng trưởng GDP bình quân của cả nước, tỉnh Bến Tre, tỉnh Trà Vinh và các vùng lân cận. Mức tăng trưởng tối đa dự kiến là 7%, đạt được sau 9 năm kể từ thời điểm định giá [3]. Nguồn thu từ khai thác hành lang an toàn giao thông được tạm tính bằng 0,25% doanh thu thu phí.

• Chi phí khai thác:

Bao gồm chi phí duy tu bảo dưỡng, chi phí vận hành và chi phí điện chiếu sáng như đã nêu ở mục 2.3.

• Tỷ suất chiết khấu i

Dùng để quy đổi các khoản thu (B_t) và chi (C_t) của từng năm về thời điểm định giá theo hệ số $1/(1+i)^t$ ở công thức (6). Tỷ suất chiết khấu lấy bằng chi phí sử dụng vốn bình quân (WACC) theo công thức (7) [3]:

$$i = \text{WACC} = R_e W_e + R_d W_d$$

Các thông số cụ thể gồm:

○ Lãi suất kỳ vọng vốn chủ sở hữu (R_e): 10%;

○ Chi phí lãi vay thương mại (R_d): 12%;

○ Tỷ trọng vốn chủ sở hữu (W_e): 15%;

○ Tỷ trọng vốn vay (W_d): 85%;

Từ các thông số trên, tỷ suất chiết khấu tính được là i = 11,7%. Sau khi quy đổi dòng tiền, giá trị hiện tại thuần (NPV) của phần cầu chính tại thời điểm tháng 12/2022 đạt G_{HTT} = 364.000.407.805 đồng (khoảng 364,000 tỷ đồng) [3].

Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên ở dự án thành phần 1 có vốn góp từ Chủ đầu tư và vốn ngân sách nhỏ hơn 30% nên lãi suất vay thương mại 12%/năm là khá lớn và đã được Kiểm toán nhà nước có ý kiến về lãi suất này [18], ngoài ra kỳ vọng lãi suất của chủ sở hữu là 10%/năm là rất hợp lý trong bối cảnh thu hút đầu tư đối với các dự án BOT hạ tầng kỹ thuật.

3.3. Định giá dự án tại tháng 12/2022

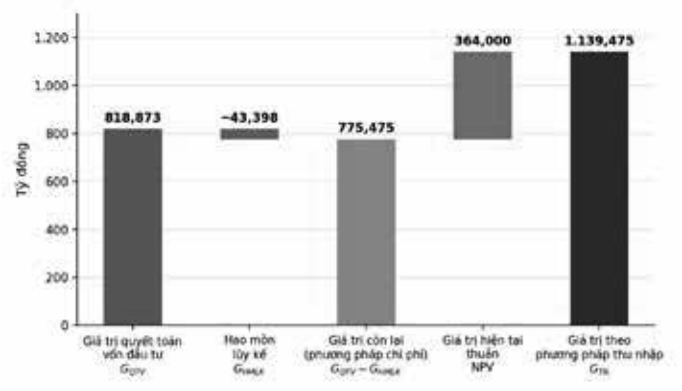
Thay các kết quả tính toán ở Mục 3.2 vào công thức (2), ta có giá trị dự án theo phương pháp thu nhập:

G_{TN} = (818,873 − 43,398) + 364,000 = 775,475 + 364,000 = 1.139,475 tỷ đồng

Kết quả tổng hợp được trình bày tại Bảng 3 và Hình 2.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả định giá phần cầu chính tại tháng 12/2022 (tỷ đồng)

Chỉ tiêu	**Ký hiệu**	**Giá trị**
Giá trị quyết toán vốn đầu tư	G_{QTV}	818,873
Giá trị hao mòn lũy kế	G_{HMLK}	43,398
Giá trị còn lại (phương pháp chi phí)	**$G_{QTV} - G_{HMLK}$**	**775,475**
Giá trị hiện tại thuần (NPV)	G_{HTT}	364,000
Giá trị theo phương pháp thu nhập	**G_{TN}**	**1.139,475**



Hình 2. Cơ cấu giá trị phần cầu chính cầu Cổ Chiên tại tháng 12/2022 (tỷ đồng)

Nếu coi giá trị quyết toán bằng chi phí xây dựng mới ($G_{XDM} \approx G_{QTV}$, chưa tính trượt giá), giá trị công trình theo phương pháp chi phí (công thức (1)) là G_{CP} = 818,873 − 43,398 = 775,475 tỷ đồng.

Do đó, khi chuyển nhượng quyền khai thác đến hết tuổi đời kinh tế của dự án, hai bên cần thương lượng giá trị trong khoảng [3]:

775,475 tỷ đồng ≤ Giá trị chuyển nhượng ≤ 1.139,475 tỷ đồng

Trường hợp thời gian chuyển nhượng ngắn hơn tuổi đời kinh tế, giá trị giao dịch sẽ được quy đổi lại. Việc tính toán dựa trên số năm chuyển nhượng, mức hao mòn và lợi nhuận thuần thực tế của các năm khai thác [3].

3.4. Bình luận

3.4.1. Cơ cấu giá trị:

Giá trị còn lại theo phương pháp chi phí chiếm khoảng 68% giá trị dự án. Phần giá trị hiện tại thuần NPV chiếm khoảng 32%; hao mòn lũy kế mới chỉ chiếm 5,6% giá trị quyết toán. Lý do là công trình mới vận hành 6 năm so với tuổi đời kinh tế 100 năm. Cận trên của khoảng giá trị cao hơn cận dưới khoảng 1,47 lần. Điều này cho thấy dư địa thương lượng giữa hai bên là rất đáng kể.

3.4.2. Ý nghĩa hai cận:

○ Cận dưới (775,475 tỷ đồng) là giá trị còn lại của vốn đã đầu tư. Bên chuyển nhượng khó có cơ sở chấp nhận mức thấp hơn con số này.

○ Cận trên (1.139,475 tỷ đồng) đã tính đến dòng tiền khai thác còn lại. Bên nhận chuyển nhượng khó chấp nhận mức giá cao hơn.

o Giá trị giao dịch thực tế sẽ phụ thuộc vào năng lực thương lượng và mức lợi nhuận kỳ vọng của các bên. Khi chứng khoán hóa, khoảng giá trị này là căn cứ tham chiếu để xác định giá chào bán cổ phần trước khi niêm yết.

3.4.3. Độ nhạy:

Chỉ số NPV phụ thuộc trực tiếp vào lưu lượng xe, tốc độ tăng trưởng lưu lượng, mức phí và tỷ suất chiết khấu. Các biến số này đều chứa đựng yếu tố bất định, đặc biệt là chính sách thu phí và vị trí trạm thu phí. Bài báo gợi ý cần bổ sung phân tích độ nhạy và mô phỏng ngẫu nhiên để đánh giá đầy đủ rủi ro dòng thu. Kinh nghiệm cao tốc thu phí tại Tây Ban Nha cho thấy lưu lượng có thể suy giảm mạnh hơn nhiều so với GDP khi kinh tế suy thoái [6], trong khi giả định tăng trưởng lưu lượng của dự án này bám theo tốc độ tăng trưởng GDP; vì vậy cần kiểm định độ nhạy của NPV đối với các kịch bản lưu lượng bất lợi. Nghiên cứu của Bain trên dữ liệu nhiều dự án đường thu phí cũng cho thấy dự báo lưu lượng thường có sai số lớn và thiên về lạc quan [19], nên giả định tăng trưởng lưu lượng của dự án càng cần được kiểm định bằng phân tích độ nhạy.

3.4.4. Giới hạn của nghiên cứu:

o Giá trị quyết toán được dùng thay cho chi phí xây dựng mới và chưa tính trượt giá.

o Mới chỉ tính hao mòn vật lý theo tuổi đời, chưa tính hao mòn chức năng và hao mòn kinh tế.

o Phạm vi định giá mới bao gồm phần cầu chính do chỉ có phần này được phê duyệt phương án tài chính.

o Cần định nghĩa nhất quán các biến số dòng tiền để tránh tính trùng vốn đầu tư.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Bài báo đã áp dụng hai phương pháp định giá cho phần cầu chính dự án BOT cầu Cổ Chiên tại thời điểm tháng 12/2022:

- Giá trị theo phương pháp chi phí: 775,475 tỷ đồng.
- Giá trị theo phương pháp thu nhập: 1.139,475 tỷ đồng.
- Chênh lệch 364,000 tỷ đồng chính là giá trị hiện tại thuần (NPV) của dòng tiền khai thác còn lại.

Việc định giá phục vụ chuyển nhượng hay chứng khoán hóa cần bảo đảm các yêu cầu tối thiểu sau [3]:

- Căn cứ vào chi phí đầu tư thực tế, trượt giá, các chi phí quá khứ (nếu có) và thời hạn chuyển nhượng.
- Hài hòa lợi ích giữa nhà đầu tư, Nhà nước và người dân.
- Do các chuyên gia có đủ năng lực chuyên môn thực hiện.
- Bảo đảm tính khoa học dựa trên chi phí đã bỏ ra và lợi ích dự kiến thu được.

4.2. Kiến nghị

Xây dựng khung pháp lý minh bạch cho việc chuyển nhượng quyền khai thác và chứng khoán hóa dự án hạ tầng. Quy định cần phù hợp với Nghị quyết số 68-NQ/TW [8] và Luật Chứng khoán [20]. Nhà nước xem nhà đầu tư tư nhân là đối tác bình đẳng, cùng chia sẻ rủi ro và cơ hội thông qua thương lượng. Kinh nghiệm của Pháp và Tây Ban Nha cho thấy cần chú trọng tính cân bằng, minh bạch trong quan hệ giữa Nhà nước và nhà nhượng quyền, cũng như cơ chế phân bổ rủi ro lưu lượng [5, 6].

Xây dựng nhiều phương án định giá và đẩy mạnh chuyển nhượng các dự án lớn để thu hút dòng vốn. Đẩy mạnh nghiên cứu chuyên sâu về phương pháp luận định giá công trình giao thông. Bổ sung phân tích độ nhạy và mô phỏng ngẫu nhiên các biến số rủi ro (lưu lượng xe, mức phí, tỷ suất chiết khấu) [7, 19].

Các cơ quan quản lý cần tạo điều kiện cho nhà nghiên cứu tiếp cận dữ liệu dự án thuận lợi và chính xác hơn [3].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thân Trọng Trần Hoan, Phạm Trường Giang, Bùi Minh Ngọc Trung, Nguyễn Thị Thùy Dung. Chứng khoán hóa nợ, giải pháp quản trị rủi ro trong đầu tư phát triển cơ sở hạ tầng tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 09, tr. 230-233, 2026. Internet: https://tapchixaydung.vn/tap-chi-xay-dung-so-09-2026-20201224000040986.html#page/232 (truy cập: tháng 09/2026).

[2] Công ty Cổ phần Thủy điện Cần Đơn (SJD). Hồ sơ doanh nghiệp và bản cáo bạch niêm yết, Sở Giao dịch Chứng khoán TP.HCM (HOSE), 2013. Internet: https://www.hsx.vn/vi/quan-ly-niem-yet/co-phieu/sjd/2286 (truy cập: tháng 07/2026).

[3] Phạm Trường Vũ. Hoàn thiện định giá công trình xây dựng cơ sở hạ tầng giao thông. Trường hợp nghiên cứu điển hình: Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên, Quốc lộ 60, Luận văn thạc sĩ, chuyên ngành Quản lý xây dựng (mã số 8580302), Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM, 2022.

[4] Nguyễn Tuấn Anh. Thời gian chuyển giao dự án đầu tư theo hợp đồng BOT: Góc nhìn từ phân tích quyền chọn. Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng-Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 19(2V), tr. 70-79, 2025. Internet: https://stce.huce.edu.vn/index.php/vn/article/view/3026 (truy cập: tháng 8/2026).

[5] Cour des comptes. Les relations entre l'État et les sociétés concessionnaires d'autoroutes, 2013. Internet: https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-relations-entre-letat-et-les-societes-concessionnaires-dautoroutes (accessed: 07/2026).

[6] J. M. Vassallo, A. Ortega and de los Ángeles Baeza, M. Risk allocation in toll highway concessions in Spain: Lessons from economic recession. Transportation research record, vol. 2297, no. 1, pp. 80-87, 2012. doi:10.3141/2297-10.

[7] B. Ashuri, H. Kashani, K.R. Molenaar, S. Lee and J. Lu. Risk-neutral pricing approach for evaluating BOT highway projects with government minimum revenue guarantee options. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 138, no. 4, pp. 545-557, 2012. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000447.

[8] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 68-NQ/TW của Bộ Chính trị về phát triển kinh tế tư nhân, 2025.

[9] Bùi Ngọc Toàn, Phan Thị Hiền, Nguyễn Thị Hậu. Định giá xây dựng công trình giao thông. NXB. Giao thông vận tải, Hà Nội, 2009.

[10] Bùi Mạnh Hùng. Định giá bất động sản. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2012.

[11] Bộ Tài chính. Thông tư số 126/2015/TT-BTC ngày 20/8/2015 ban hành các Tiêu chuẩn thẩm định giá Việt Nam (Tiêu chuẩn số 09 - Cách tiếp cận từ chi phí), 2015.

[12] Trần Thị Bạch Điệp. Giáo trình định giá sản phẩm xây dựng. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2011.

[13] Bộ trưởng Bộ Giao thông vận tải. Quyết định số 1309/QĐ-BGTVT ngày 17/5/2013 về việc tách và phê duyệt Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên - Quốc lộ 60, tỉnh Bến Tre và Trà Vinh theo hình thức Hợp đồng BOT, 2013.

[14] Bộ Giao thông vận tải và Liên danh Tổng Công ty Xây dựng công trình giao thông 1 - CTCP, Công ty Cổ phần Đầu tư xây dựng Tuấn Lộc. Hợp đồng số 40/BOT-BGTVT ngày 08/8/2014 về việc thực hiện hợp đồng xây dựng - kinh doanh - chuyển giao Dự án thành phần 1: Dự án đầu tư xây dựng công trình cầu Cổ Chiên, Quốc lộ 60, tỉnh Trà Vinh và Bến Tre, 2014.

[15] Bộ Tài chính. Thông tư số 136/2015/TT-BTC ngày 31/8/2015 quy định mức thu, chế độ thu, nộp, quản lý và sử dụng phí sử dụng đường bộ trạm thu phí cầu Cổ Chiên, Quốc lộ 60, tỉnh Trà Vinh, 2015.

[16] Bộ Giao thông vận tải. Văn bản số 1906/BGTVT-TC ngày 27/02/2017 về việc thỏa thuận giá trị quyết toán (đợt 1) Dự án thành phần 1 - Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên, Quốc lộ 60 theo hình thức hợp đồng BOT (phần vốn BOT), 2017.

[17] Bộ Giao thông vận tải. Văn bản số 4009/BGTVT-TC ngày 02/5/2019 về việc thỏa thuận giá trị quyết toán (đợt 2) Dự án thành phần 1 - Dự án đầu tư xây dựng cầu Cổ Chiên, Quốc lộ 60 theo hình thức hợp đồng BOT (phần vốn BOT), 2019.

[18] Lê Thanh, Nguyên Dương. Phải giảm thu phí dự án BOT cầu Cổ Chiên hơn 5 năm, 2016. Internet: https://tuoitre.vn/phai-giam-thu-phi-du-an-bot-cau-co-chien-hon-5-nam-1167094.htm (truy cập: tháng 07/2026).

[19] R. Bain. Error and optimism bias in toll road traffic forecasts. Transportation, vol. 36, no. 5, pp. 469-482, 2009. doi:10.1007/s11116-009-9199-7.

[20] Quốc hội. Luật Chứng khoán số 54/2019/QH14, 2019.

■Ngày nhận bài: 10/9/2026 ■Ngày sửa bài: 24/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Vai trò của giám sát, đánh giá đầu tư trong quản lý huy động vốn phát triển hạ tầng đô thị tỉnh Lạng Sơn

The role of investment monitoring and evaluation in managing capital mobilization for urban infrastructure development in Lang Son Province

> HOÀNG DUY LONG[1], NGUYỄN QUỐC TOẢN[2,*]
[1]Văn phòng Thuế TP Hà Nội
[2]Khoa Kinh tế và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: toannq@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Giám sát, đánh giá đầu tư thường được tiếp cận chủ yếu dưới góc độ kiểm tra và giám sát việc tuân thủ, trong khi mối liên hệ giữa hoạt động này với huy động và quản lý nguồn vốn đầu tư hạ tầng đô thị chưa được phân tích đầy đủ. Bài viết tiếp cận giám sát, đánh giá đầu tư như một nền tảng thông tin phục vụ quản lý nguồn vốn, xem xét qua ba kênh: xác nhận mức độ sẵn sàng của dự án, chuyển vốn cam kết thành vốn thực hiện và kiểm soát rủi ro tài khóa. Dữ liệu là năm báo cáo giám sát, đánh giá tổng thể đầu tư của tỉnh Lạng Sơn giai đoạn 2021 - 2025 và các phụ biểu. Báo cáo bao phủ toàn bộ dự án vốn nhà nước và giúp nhận diện điểm nghẽn: năm 2025, trong 78 dự án chậm tiến độ, 37 dự án do giải phóng mặt bằng và 2 dự án do bố trí vốn. Dư địa hoàn thiện nằm ở thống nhất mẫu số tỷ lệ theo nguồn vốn, mở rộng giám sát cộng đồng và bổ sung chỉ tiêu về thu xếp vốn, nghĩa vụ tài khóa. Bài đề xuất bộ chỉ tiêu, cảnh báo ba mức và giám sát cộng đồng theo rủi ro; do báo cáo không tách riêng hạ tầng đô thị, các kết luận mang tính khám phá.

Từ khóa: Giám sát đầu tư; đánh giá đầu tư; huy động vốn; hạ tầng đô thị; Lạng Sơn.

ABSTRACT

Investment monitoring and evaluation (M&E) is usually treated as a compliance function, and its link to capital mobilization for urban infrastructure is seldom analyzed. We treat M&E as an information infrastructure for managing financing and examine it through three channels: verifying project readiness, converting committed funds into executed spending, and controlling fiscal risk. Using Lang Son province's five annual M&E reports for 2021 - 2025 and their annexes, we find that the reports cover all state-funded projects and help identify bottlenecks: in 2025, of 78 delayed projects, 37 were delayed by land clearance and 2 by capital allocation. Room for improvement lies in harmonizing denominators by funding source, extending community monitoring, and adding indicators on financing status and fiscal obligations. We propose financing-oriented indicators, a three-level early-warning scheme and risk-based community monitoring; as urban infrastructure is not reported separately, the findings are exploratory.

Keywords: Investment monitoring; investment evaluation; capital mobilization; urban infrastructure; Lang Son.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hạ tầng đô thị cần vốn lớn, thu hồi chậm và liên quan nhiều cấp chính quyền, nên khả năng huy động vốn phụ thuộc vào nguồn lực sẵn có, cách chuẩn bị dự án, mức minh bạch thông tin và kiểm soát rủi ro [1 - 3]. OECD khuyến nghị quản trị hạ tầng toàn vòng đời có theo dõi, đánh giá [4]; khung PIMA của IMF đặt giám sát thực hiện trong chuỗi thể chế quyết định hiệu quả đầu tư công [5].

Giám sát, đánh giá không trực tiếp tạo ra vốn, nhưng cung cấp thông tin mà quyết định huy động vốn cần: dự án đã đủ điều kiện nhận vốn chưa, vốn cam kết có thành khối lượng không, và khi chậm thì nguyên nhân nằm ở nguồn vốn, thủ tục, mặt bằng hay năng lực nhà đầu tư. IMF ước tính quản trị tốt hơn có thể thu hẹp đáng kể thất thoát hiệu quả trong đầu tư hạ tầng công [6].

Lạng Sơn là tỉnh miền núi, biên giới, triển khai đồng thời đầu tư công, PPP và dự án ngoài ngân sách giai đoạn 2021 - 2025, nên phù hợp để xem xét giám sát, đánh giá hỗ trợ quản lý nguồn vốn đến đâu. Bài trả lời ba câu hỏi: (i) hệ thống của tỉnh bao phủ và cung cấp thông tin đến mức nào; (ii) thông tin ấy phục vụ huy động vốn qua những kênh nào; (iii) có thể hoàn thiện gì trong khung pháp lý hiện hành. Đóng góp gồm khung ba kênh, ma

trận đối chiếu và bộ chỉ tiêu cùng cơ chế cảnh báo có thể thử nghiệm ở cấp tỉnh.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Khái niệm và khung pháp lý

Từ 14/01/2026, giám sát, đánh giá đầu tư thực hiện theo Nghị định số 19/2026/NĐ-CP, thay thế Nghị định số 29/2021/NĐ-CP và được sửa đổi bởi Nghị định số 96/2026/NĐ-CP [7, 8]. Giám sát gồm giám sát chương trình, dự án và giám sát tổng thể; đánh giá gồm đánh giá ban đầu, giữa kỳ, kết thúc, tác động và đột xuất [7]. Mẫu báo cáo và chế độ báo cáo trực tuyến theo Thông tư số 44/2026/TT-BTC, hiệu lực từ 22/4/2026 [9]; giám sát cộng đồng theo Điều 79 Luật Đầu tư công [7].

Vốn đầu tư công thuộc Luật Đầu tư công số 58/2024/QH15 (sửa đổi bởi Luật số 90/2025/QH15) và các nghị định hướng dẫn [10 - 13]; đầu tư kinh doanh thuộc Luật Đầu tư số 143/2025/QH15 [14]; PPP thuộc Luật số 64/2020/QH14 [15]. Hạ tầng đô thị được xét theo Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, Luật Xây dựng [16 - 19], tập trung vào giao thông, cấp thoát nước, năng lượng, chiếu sáng, xử lý chất thải. "Vốn đầu tư" được hiểu theo nghĩa tác nghiệp: các nguồn tài chính hình thành, mở rộng hoặc nâng cấp hạ tầng, gồm vốn đầu tư công, vốn nhà nước ngoài đầu tư công, PPP, vốn doanh nghiệp và nguồn hợp pháp khác.

"Giám sát, đánh giá đầu tư trong quản lý huy động vốn" được hiểu là quá trình theo dõi, kiểm tra, đánh giá việc chuẩn bị dự án, thu xếp nguồn, thực hiện vốn, nghĩa vụ và rủi ro, để điều chỉnh kế hoạch, phối hợp nguồn và xử lý điểm nghẽn; khác với thanh tra, kiểm toán hay giám sát thi công. Số liệu 2021-2024 lập theo Nghị định số 29/2021/NĐ-CP [20] và, từ 2023, Thông tư số 05/2023/TT-BKHĐT [21]. Báo cáo 2025 (09/3/2026) viện dẫn Nghị định số 19/2026/NĐ-CP nhưng vẫn dùng biểu mẫu cũ chờ hướng dẫn mới [44], nên thuộc kỳ chuyển tiếp; bài dùng văn bản cũ làm căn cứ lịch sử, khung hiện hành khi đề xuất.

2.2. Tổng quan các nghiên cứu liên quan

Alm [1], O'Brien và Pike [3], Vammalle và Bambalaite [2] và O'Brien và cộng sự [22] cho thấy khuôn khổ tài trợ, kỷ luật tài khóa và quản trị đa cấp quyết định khả năng huy động vốn, nhưng ít mô tả dòng thông tin từ dự án đến quyết định tài chính, trong bối cảnh OECD hoặc Anh khác xa một tỉnh miền núi Việt Nam.

Dabla-Norris và cộng sự [23], OECD [4, 24], PIMA [5], Well Spent [6] và Ngân hàng Thế giới [25] đo quản trị đầu tư từ thẩm định đến đánh giá sau đầu tư; PIMA tách thể chế "trên giấy" khỏi hiệu lực thực tế. Đây là nền tảng vững nhất của bài, nhưng ở cấp quốc gia, đo thể chế chứ không đo chất lượng dữ liệu giám sát, và chưa nối giám sát với huy động vốn địa phương.

Incaltarau và cộng sự. [26] và Tosun [27] cho thấy năng lực bộ máy quyết định mức hấp thụ quỹ EU. Ở Việt Nam, Pham và cộng sự [28] xếp giải phóng mặt bằng đứng đầu nguyên nhân chậm giải ngân vốn công cho giao thông, nhưng trọng số sát nhau và dữ liệu là ý kiến chuyên gia.

Thai và cộng sự [29] xác định 20 yếu tố thuộc vai trò Nhà nước trong thu hút PPP giao thông, song không xét theo dõi sau ký hợp đồng. Krasnopeeva và Morozkina [30] và Ngân hàng Thế giới [31] nhấn mạnh theo dõi, công khai nghĩa vụ dự phòng, nhưng khó chuyển xuống cấp tỉnh.

Olken [32], trên hơn 600 dự án đường làng ở Indonesia, thấy kiểm toán từ trên xuống giảm thất thoát rõ hơn tham gia cộng đồng, gợi ý kết hợp hai cách, dù bối cảnh là dự án nhỏ nông thôn.

Nhóm Nguyễn Liên Hương, Nguyễn Quốc Toản đặt nền cho khái niệm giám sát dự án [33], chỉ tiêu NPV, NAV, NFV [34], vướng mắc pháp lý [35] và vai trò thanh tra, kiểm toán [36]. Gần với huy động vốn đô thị có Đào Thị Như và cộng sự [37], Nguyễn Liên Hương và cộng sự [38] và Trần Thị Kim Phú [39]. Dòng này chủ yếu bàn vốn nhà nước, chưa dùng kết quả giám sát để kiểm tra độ sẵn sàng hay theo dõi chuyển cam kết thành thực hiện.

2.3. Khoảng trống và khung phân tích

Hai dòng nghiên cứu ít gặp nhau: tài chính hạ tầng đô thị giải thích vốn đến từ đâu; quản trị đầu tư công, giám sát và đánh giá giải thích dự án được chọn, thực hiện và kiểm soát ra sao. Chỗ nối, tức kết quả giám sát có trở thành đầu vào cho quyết định huy động và điều chỉnh nguồn vốn hay không, không có nhiều nghiên cứu. Bài dùng ba kênh để hình dung chỗ nối đó (Hình 1).

Kênh thứ nhất là xác nhận mức độ sẵn sàng: nhà đầu tư và tổ chức tín dụng chỉ giải ngân khi mặt bằng, thủ tục, hồ sơ chuẩn bị đầu tư và năng lực nhà đầu tư được đáp ứng, và giám sát cung cấp bằng chứng về các điều kiện ấy. Kênh thứ hai là chuyển cam kết thành thực hiện, đo khoảng cách giữa vốn cam kết, thu xếp và thực hiện, gần với khả năng hấp thụ trong [26, 27]. Kênh thứ ba là kiểm soát rủi ro tài khóa và trách nhiệm giải trình, gồm nghĩa vụ vốn nhà nước, hỗ trợ công, xử lý tài chính và phản hồi cộng đồng [30 - 32]. Khung này là giả định phân tích, chưa phải mô hình đã kiểm định.



Hình 1. Khung ba kênh nối giám sát, đánh giá đầu tư với quản lý huy động vốn

(Nguồn: Tác giả đề xuất)

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu dùng phân tích tài liệu, thống kê mô tả và đối chiếu theo thời gian. Dữ liệu là năm báo cáo giám sát, đánh giá tổng thể đầu tư của Lạng Sơn 2021 - 2025 [40 - 44] và phụ biểu (Phụ biểu 06 về giám sát cộng đồng; 01 và 05 về vốn theo nguồn năm 2025). Quy trình gồm: tổng hợp độ bao phủ và tính lại tỷ lệ từ phụ biểu; trích bằng chứng về chậm tiến độ, vốn, thủ tục, năng lực nhà đầu tư, xử lý tài chính và gán vào kênh ở mục 2.3; đối chiếu với tài liệu quốc tế và trong nước; nhận diện dư địa hoàn thiện và đề xuất.

Dữ liệu có bốn giới hạn. Báo cáo không tách riêng hạ tầng đô thị nên chỉ tiêu tổng hợp dùng để xem xét hệ thống giám sát cấp tỉnh. Phạm vi phụ biểu giám sát cộng đồng thay đổi giữa các năm nên tỷ lệ chỉ mô tả từng năm. Số liệu vốn theo nguồn chỉ có năm 2025, dạng tổng hợp, không có chuỗi cam kết - thu xếp - thực hiện từng dự án, nên không kiểm định được quan hệ nhân quả. Báo cáo là tài liệu hành chính, năm 2025 thuộc giai đoạn chuyển tiếp pháp lý và sang chính quyền hai cấp nên một số số liệu cần đối chiếu mục 4.1.

4. KẾT QUẢ

4.1. Độ bao phủ và chất lượng dữ liệu

Báo cáo của Lạng Sơn có độ bao phủ hành chính cao: 506 dự án năm 2021, rồi 1.177, 1.217, 1.313 và 1.318 dự án các năm 2022 - 2025, đều đạt 100% trong phạm vi thống kê (Bảng 1). Năm 2025, 1.318 là dự án vốn nhà nước; 5 dự án PPP và 374 dự án vốn khác ở các phụ biểu riêng là khối cần tiếp tục hoàn thiện dữ liệu [44].

Bảng 1. Một số chỉ tiêu giám sát, đánh giá đầu tư tại Lạng Sơn, 2021 - 2025

Năm	Dự án thuộc chế độ báo cáo	Giám sát cộng đồng	Kết quả đáng chú ý	Nguồn
2021	511	242/511 (47,4%)	Tỉnh đôn đốc đơn vị báo cáo	[40], Mục VIII.1; Phụ biểu 06
2022	1.177	263/1.177 (22,3%)	260 dự án đúng quy định, 1 vi phạm, 2 chưa xác định	[41], Mục VIII.1 và IX; Phụ biểu 06
2023	1.217	353/663 (53,2%)	350 dự án đúng quy định; 3 vi phạm	[42]; Phụ biểu 06
2024	1.313	352/1.303 (27,0%)	352 dự án đúng quy định	[43], Mục IX.1; Phụ biểu 06
2025	1.318 dự án vốn nhà nước (Phụ biểu 04, 05 ghi thêm 5 dự án PPP và 374 dự án vốn khác)	153/1.326 (11,5%)	78 dự án chậm (5,9%); 152 đúng quy định, 1 vi phạm; chưa có đánh giá tác động	[44], Mục IX-X; Phụ biểu 03.1, 06

(Nguồn: UBND tỉnh Lạng Sơn [40 - 44])

Giám sát cộng đồng biến động: 47,4%, 22,3%, 53,2%, 27,0% và 11,5% từ 2021 đến 2025, tính theo mẫu số của Phụ biểu 06, vốn khác số dự án thuộc chế độ báo cáo (năm 2023: 663 so với 1.217). Năm 2025, thuyết minh ghi 153/277 còn phụ biểu ghi 153/1.326 [44]. Giám sát tập trung vào dự án nhỏ cấp xã (124/188, 66,0%), so với 9/764 dự án đầu tư công, vốn nhà nước ngoài đầu tư công và PPP (1,2%) và 20/374 dự án vốn khác (5,3%). Các tỷ lệ chỉ mô tả từng năm; mức giảm 2025 chưa quy được cho nguyên nhân cụ thể, dù báo cáo cho biết các ban giám sát phải kiện toàn khi chuyển sang chính quyền hai cấp [44].

Số dự án phát hiện có vi phạm ở mức thấp (1/263 dự án năm 2022, 3/353 dự án năm 2023 và 1/153 dự án năm 2025). Kết quả này có thể phản ánh mức độ tuân thủ tương đối tốt, nhưng cũng có thể liên quan đến năng lực và phạm vi phát hiện vi phạm của hoạt động giám sát. Đáng chú ý, các báo cáo năm 2024 - 2025 cho thấy vẫn còn dư địa nâng cao năng lực chuyên môn của đội ngũ giám sát, đặc biệt đối với các nội dung liên quan đến quy trình kỹ thuật, định mức và vật tư [43, 44], bằng chứng hiện có chưa tách được hai yếu tố.

Báo cáo 2025 lập trong giai đoạn chuyển tiếp nên có một số chênh lệch giữa thuyết minh và phụ biểu cần thống nhất: tổng kế hoạch vốn 41.738,8 so với 41.783,8 tỷ đồng, giá trị thực hiện 11.415,7 so với 15.840,4 tỷ đồng, số dự án PPP được thống kê là 6 và 5 dự án; Phụ biểu 03.1 chưa nêu số tiền của 3 dự án vi phạm chất lượng và 3 dự án thất thoát, lãng phí; giá trị thực hiện và giải ngân ở Phụ biểu 01 cùng một số liệu [44]. Các chênh lệch này nhỏ so với quy mô báo cáo, song cho thấy lợi ích của đối chiếu tự động trên Hệ thống, đúng mục tiêu nhóm F ở Bảng 3.

4.2. Bằng chứng theo ba kênh

Báo cáo 2024 thống kê 6 dự án PPP, trong đó 4 dự án BT chậm do giải phóng mặt bằng, điều chỉnh báo cáo nghiên cứu khả thi và thủ tục pháp lý [43]. Năm 2025, 78/1.318 dự án vốn nhà nước chậm tiến độ (5,9%): 37 do giải phóng mặt bằng (47,4%), 16 do thủ tục (20,5%), 5 do năng lực chủ đầu tư, ban quản lý và nhà thầu (6,4%), 2 do bố trí vốn (2,6%), 18 do nguyên nhân khác (23,1%) [44]. Phân bố này nghiêng về nhóm dự án có nguồn nhưng chưa đủ điều kiện; do mỗi dự án chỉ gán một nguyên nhân, tỷ trọng thấp của vốn không loại trừ vai trò thứ yếu của nó.

Bảng 2. Vốn kế hoạch và vốn thực hiện theo nguồn, Lạng Sơn năm 2025 (tỷ đồng)

Nguồn vốn	Kế hoạch / vốn cơ sở	Thực hiện	Tỷ lệ (%)
Vốn đầu tư công	7.769,7	6.152,6	79,2
Vốn nhà nước ngoài đầu tư công	2.700,4	1.815,1	67,2
PPP: vốn tư nhân (vốn chủ sở hữu và vốn vay)	1.782,4	1.782,4	100,0
Vốn xã hội hóa trong dự án đầu tư công	75,3	75,3	100,0
Dự án vốn khác, trong nước	18.746,0	6.010,0	32,1
Dự án vốn khác, nước ngoài	10.710,0	5,0	0,0
Tổng cộng	41.783,8	15.840,4	37,9

(Nguồn: [44], Phụ biểu 01 và 05)

Khối ngoài ngân sách phức tạp hơn. Kế hoạch số 116/KH-UBND (21/4/2025) xác định 104 dự án chậm, vướng mắc thuộc thẩm quyền tỉnh (13 đầu tư công, 4 PPP, 87 ngoài ngân sách) với 285 nhiệm vụ giao 14 cơ quan, cho thấy tỉnh chủ động xử lý điểm nghẽn. Trong 12 dự án ngoài ngân sách phải hoàn thành năm 2025, 5 dự án hoàn thành và 7 phải điều chỉnh tiến độ; các dự án lớn chậm chủ yếu vướng giải phóng mặt bằng, huy động vốn và thủ tục [44]. Với PPP, Phụ biểu 04 ghi 4 dự án chậm (3 do mặt bằng, 1 do năng lực nhà đầu tư), còn thuyết minh nêu thêm điều chỉnh quy hoạch, điều chỉnh dự án và chờ kết luận thanh tra [44]; phân loại theo biểu chưa bao quát hết các điều kiện pháp lý.

Với cao tốc Hữu Nghị - Chi Lăng, báo cáo 2024 ghi đã bàn giao 81,84% diện tích mặt bằng và khoảng 79% chiều dài nhưng giá trị thực hiện là 472,28/6.580,82 tỷ đồng (7,18% giá trị hợp đồng EC) [43]. Hệ thống nhận diện được khoảng cách này; để giải thích cần thêm dữ liệu vốn cam kết và vốn đã thu xếp. Số liệu 2025 cho phép nhìn kênh này ở cấp toàn tỉnh (Bảng 2).

Năm 2025, kế hoạch vốn 41.783,8 tỷ đồng, thực hiện 15.840,4 tỷ đồng (37,9%); theo nguồn là 79,2% với vốn đầu tư công, 67,2% với vốn nhà nước ngoài đầu tư công, 20,4% với dự án vốn khác. Mẫu số được xác định khác nhau: với dự án vốn khác, 29.456,0 tỷ đồng ở cột kế hoạch bằng 63.563 tỷ đồng vốn đăng ký trừ 34.107 tỷ đồng thực hiện lũy kế (Phụ biểu 05), còn với vốn đầu tư công là kế hoạch giao hằng năm. Vì vậy cùng giá trị thực hiện 6.015 tỷ đồng có thể cho 20,4%, 9,5% (so với tổng vốn đăng ký) hay 97,3% (so với vốn đăng ký tăng thêm trong năm); thống nhất mẫu số sẽ giúp xác lập ngưỡng cảnh báo rõ hơn. Với PPP, vốn tư nhân được ghi thực hiện bằng 100% kế hoạch, cần làm rõ khi đối chiếu với tiến độ từng dự án.

Cam kết và thực hiện cách xa nhất ở nhà đầu tư nước ngoài: 22 dự án đăng ký 10.850 tỷ đồng, thực hiện lũy kế khoảng 145 tỷ đồng (1,3%), so với 39.977/52.713 tỷ đồng (75,8%) của nhóm trong nước [44]; báo cáo chưa nêu giai đoạn từng dự án nên chưa thể coi là chậm, và chỉ tiêu trạng thái thu xếp vốn sẽ bổ sung thông tin này. Giải ngân vốn đầu tư công là 6.484,5 tỷ đồng, bằng 102,7% kế hoạch Thủ tướng giao nhưng 75,3% kế hoạch địa phương, gồm cả tạm ứng; số dư tạm ứng đến 15/11/2025 là 3.611,6 tỷ đồng, phần quá hạn chủ yếu là đền bù giải phóng mặt bằng của các dự án lớn [44]. Giải ngân vì vậy chưa đồng nghĩa với khối lượng hoàn thành.

Xử lý tài chính năm 2024 ở mức vài tỷ đồng [43]; năm 2025 là 634,2 tỷ đồng, trong đó 632,1 tỷ đồng của 6 dự án qua thanh tra, kiểm toán trung ương (408,4 tỷ đồng theo Kết luận số 375/KL-TTCP và 177,8 tỷ đồng của cao tốc Hữu Nghị - Chi Lăng theo Kết luận số 386/KL-TTCP) [44]. Điều đáng lưu ý là xử lý tài chính tập trung ở vài dự án lớn, trong khi giám sát cộng đồng chỉ phủ 9/764 dự án thuộc nhóm này; giám sát cộng đồng vẫn bổ sung lớp giải trình, nhất là với đất đai, tái định cư và không gian công cộng.

Nghĩa vụ vốn nhà nước trong PPP hiện rõ ở năm 2025: Phụ biểu 01 ghi 4.045,6 tỷ đồng kế hoạch và 3.628,3 tỷ đồng thực hiện, khoảng 59% vốn đầu tư công thực hiện (nhóm tác giả tính); dự án cao tốc có khối lượng 3.890,8 tỷ đồng, chiếm 59,7% kế hoạch vốn năm 2025 của tỉnh [44]. Sau điều chỉnh chủ trương đầu tư (Nghị quyết số 18/NQ-HĐND ngày 28/4/2025), dự án cần thêm 2.700 tỷ đồng ngân sách nhà nước, trong đó 500 tỷ đồng đã bố trí và 2.200 tỷ đồng chuyển sang 2026 - 2030; tỉnh đề nghị Bộ Tài chính hỗ trợ 2.200 tỷ đồng [44]. Đây là minh họa cho kênh

thứ ba: nghĩa vụ vốn nhà nước của một dự án PPP có thể tác động lớn đến kế hoạch đầu tư công của tỉnh, nên phù hợp làm chỉ tiêu theo dõi định kỳ.

5. THẢO LUẬN: DƯ ĐỊA HOÀN THIỆN, NGUYÊN NHÂN VÀ ĐỐI CHIẾU VỚI NGHIÊN CỨU TRƯỚC

Thứ nhất, chất lượng dữ liệu còn dư địa hoàn thiện: một số đơn vị báo cáo chậm, số liệu cấp huyện còn phải ước, chủ đầu tư và nhà đầu tư cập nhật chưa đầy đủ, bộ phận giám sát chủ yếu kiêm nhiệm [40, 41, 43, 44]. Bao phủ 100% dự án là nền tảng tốt; để chất lượng dữ liệu tương ứng cần thêm khâu đối chiếu, đúng lưu ý của PIMA về khoảng cách giữa thiết kế và hiệu lực [5].

Thứ hai, giám sát cộng đồng dao động (11,5% - 53,2%) và cần thêm đào tạo, kinh phí [43, 44]. Thứ ba, bộ chỉ tiêu nghiêng về tuân thủ, tiến độ và giải ngân; cần thống nhất mẫu số, tách thực hiện với giải ngân và bổ sung vốn cam kết, vốn đã thu xếp, nghĩa vụ tài khóa PPP. Thứ tư, kết quả giám sát có thể được dùng nhiều hơn trong quản lý danh mục, với ngưỡng và tiêu chí cho các quyết định bố trí, điều chuyển, tạm dừng hay tái cấu trúc nguồn.

Nguyên nhân chủ yếu mang tính hệ thống: dữ liệu phân tán ở nhiều cơ quan, năng lực báo cáo chưa đồng đều, giám sát thường được hiểu chủ yếu là nghĩa vụ báo cáo, dự án đa nguồn vốn khiến giám sát theo từng thủ tục khó phản ánh rủi ro tài chính toàn dự án (khớp với [39]), và đợt sắp xếp chính quyền hai cấp làm chậm thêm giải phóng mặt bằng, thủ tục [44].

Về đối chiếu, giải phóng mặt bằng đứng đầu nguyên nhân chậm (37/78 dự án, so với 2/78 do bố trí vốn) nhất quán với Pham và cộng sự. [28], dù nguồn dữ liệu khác nhau. Kết quả ủng hộ cách đặt vấn đề "có nguồn nhưng chưa đủ điều kiện" cho khối vốn nhà nước; với khối ngoài ngân sách, khoảng cách giữa vốn đăng ký và vốn thực hiện cho thấy điều kiện vốn và năng lực nhà đầu tư cần theo dõi riêng. Vai trò của năng lực bộ máy [26, 27] củng cố yêu cầu nâng năng lực báo cáo; giám sát cộng đồng ít hiện diện ở dự án lớn phù hợp với đề xuất kết hợp kiểm tra chuyên môn [32]; nghĩa vụ vốn nhà nước của cao tốc ở dạng số tổng hợp, chưa là chỉ tiêu theo dõi như kinh nghiệm về nghĩa vụ dự phòng [30, 31].

6. GIẢI PHÁP VÀ KIẾN NGHỊ

Các đề xuất dưới đây đặt trong khung pháp lý hiện hành và ưu tiên tận dụng Hệ thống thông tin về giám sát, đánh giá đầu tư đã vận hành [7, 9] trước khi thêm biểu mẫu mới.

Xây dựng bộ chỉ tiêu giám sát huy động vốn. Sáu nhóm chỉ tiêu tối thiểu ở Bảng 3, tương thích Luật Đầu tư công và nghị định hướng dẫn [10, 12, 13]; với PPP và ngoài ngân sách tách vốn đăng ký, vốn chủ sở hữu, vốn vay đã thu xếp và vốn thực hiện. Mỗi tỷ lệ nêu rõ mẫu số; thực hiện tách khỏi giải ngân. Nên rà soát phụ biểu của Thông tư số 44/2026/TT-BTC [9] để xem chỉ tiêu nào đã khai thác được.

Bảng 3. Bộ chỉ tiêu giám sát huy động vốn đề xuất cho dự án hạ tầng đô thị

Nhóm	Chỉ tiêu	Quyết định phục vụ
A. Nhu cầu và nguồn	Tổng vốn cần huy động; cơ cấu theo nguồn (đầu tư công, vốn nhà nước ngoài đầu tư công, PPP, vốn chủ sở hữu, vốn vay, khác)	Lập, rà soát kế hoạch vốn
B. Cam kết và thu xếp	Vốn cam kết; vốn đã thu xếp (góp vốn chủ sở hữu đã thực hiện, hợp đồng tín dụng đã ký); điều kiện tiên quyết còn lại	Tiếp tục bố trí hoặc điều chuyển vốn
C. Thực hiện	Vốn thực hiện; thời điểm giải ngân đầu tiên; tỷ lệ thực hiện trên vốn đăng ký (dự án ngoài ngân sách)	Cảnh báo chậm
D. Điều kiện sẵn sàng	Tỷ lệ mặt bằng bàn giao theo diện tích và chiều dài; thủ tục pháp lý còn vướng; số lần điều chỉnh dự án	Phối hợp xử lý liên ngành
E. Nghĩa vụ tài khóa và rủi ro	Nghĩa vụ vốn nhà nước và hỗ trợ công của PPP; rủi ro thay thế nguồn; kiến nghị xử lý tài chính	Tạm dừng hoặc tái cấu trúc nguồn
F. Chất lượng dữ liệu giám sát	Tỷ lệ báo cáo đúng hạn, đầy đủ, nhất quán giữa các nguồn; tỷ lệ số liệu phải ước tính	Đánh giá năng lực báo cáo

(Nguồn: Tác giả đề xuất)

Thiết lập cảnh báo sớm gắn với quyết định danh mục. Ba trạng thái: xanh khi nguồn đã xác định và điều kiện giải ngân cơ bản hoàn thành; vàng khi có cam kết nhưng còn điều kiện tiên quyết; đỏ khi nguồn chưa chắc chắn hoặc dự án chậm kéo dài. Ngưỡng do cơ quan có thẩm quyền xác lập sau thử nghiệm, vì chưa có dữ liệu hiệu chỉnh; cốt lõi là dùng kết quả cảnh báo khi rà soát kế hoạch vốn.

Tích hợp dữ liệu bằng mã dự án thống nhất. Mã dự án dùng xuyên suốt đầu tư công, đất đai, xây dựng, giải phóng mặt bằng, PPP và xúc tiến đầu tư cho phép nối dữ liệu giám sát với quản lý kế hoạch và nguồn vốn, phù hợp với Hệ thống theo Nghị định số 19/2026/NĐ-CP và Thông tư số 44/2026/TT-BTC [7 - 9].

Chuyển trọng tâm giám sát PPP và đầu tư ngoài ngân sách sang khả năng thực hiện nghĩa vụ tài chính. Theo dõi định kỳ tiến độ góp vốn chủ sở hữu, ký tín dụng, giải ngân vốn vay, điều kiện giải ngân và nghĩa vụ hỗ trợ công của dự án lớn [30, 31]. Với cao tốc Hữu Nghị - Chi Lăng, khoản vốn nhà nước bổ sung 2.200 tỷ đồng cho 2026 - 2030 nên được theo dõi cùng kế hoạch đầu tư công trung hạn [44].

Giám sát cộng đồng theo rủi ro. Ưu tiên dự án tác động lớn đến đất đai, tái định cư, môi trường, công trình công cộng và dự án có lịch sử chậm, kết hợp kiểm tra chuyên môn [32]. Năm 2025 giám sát cộng đồng phủ 124/188 dự án nhỏ cấp xã và 9/764 dự án đầu tư công, vốn nhà nước ngoài đầu tư công và PPP [44]; có thể mở rộng, kèm đào tạo, kinh phí tối thiểu (Nghị định số 19/2026/NĐ-CP có quy định chi phí hỗ trợ [7]) và cơ chế phản hồi có thời hạn.

Dùng kết quả giám sát để đánh giá năng lực và tăng công khai có chọn lọc. Lịch sử thực hiện, mức tuân thủ báo cáo, khả năng giải ngân và xử lý vướng mắc nên là dữ liệu đầu vào khi giao dự án mới hoặc lựa chọn nhà đầu tư. Với dự án trọng điểm, nên công khai tình trạng giải phóng mặt bằng, nguồn vốn bố trí, vốn thực hiện và tiến độ xử lý vướng mắc, vừa phục vụ giám sát xã hội vừa giảm bất cân xứng thông tin cho tổ chức tín dụng và nhà đầu tư.

7. KẾT LUẬN

Báo cáo giám sát, đánh giá đầu tư của Lạng Sơn giai đoạn 2021 - 2025 đã tạo nền hành chính rộng, bao phủ 100% dự án thuộc phạm vi thống kê từng năm, và giúp nhận diện điểm nghẽn: trong 78 dự án vốn nhà nước chậm năm 2025, 37 dự án do giải phóng mặt bằng và 2 dự án do bố trí vốn; ở khối PPP và ngoài ngân sách, điều kiện sẵn sàng và năng lực nhà đầu tư cần được theo dõi sát hơn. Các chức năng này có liên hệ với khả năng chuyển vốn cam kết thành vốn thực hiện, tuy bằng chứng hiện có mới ở mức gián tiếp.

Để trở thành công cụ của quản lý huy động vốn, giám sát, đánh giá nên đo trạng thái tài chính dự án với mẫu số rõ ràng, cảnh báo sớm rủi ro nguồn, liên thông dữ liệu và nối kết quả với quyết định danh mục. Hạn chế của nghiên cứu: dữ liệu không tách riêng hạ tầng đô thị; số liệu vốn theo nguồn chỉ có một năm; báo cáo 2025

thuộc kỳ chuyển tiếp nên cần đối chiếu thêm. Hướng tiếp theo là trích nhóm hạ tầng đô thị từ Phụ biểu 07, mở rộng sang nhiều tỉnh và phỏng vấn tổ chức tín dụng, nhà đầu tư về thông tin giám sát họ thực sự dùng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. Alm. Financing urban infrastructure: Knowns, unknowns, and a way forward. J. Econ. Surv., vol. 29, no. 2, pp. 230 - 262, 2015, doi: 10.1111/joes.12045.

[2] C. Vammalle and I. Bambalaite. Funding and financing of local government public investment: A framework and application to five OECD countries. OECD Working Papers on Fiscal Federalism, no. 34, OECD Publishing, Paris, France, 2021. Internet: https://www.oecd.org/en/publications/funding-and-financing-of-local-government-public-investment_162d8285-en.html (accessed: 9/2026).

[3] P. O'Brien and A. Pike. The governance of local infrastructure funding and financing. Infrastruct. Complex., vol. 2, art. no. 3, 2015, doi: 10.1186/s40551-015-0007-6.

[4] OECD, Recommendation of the Council on the Governance of Infrastructure, OECD/LEGAL/0460. Paris, France: OECD, 2020. Internet: https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0460 (accessed: 9/2026).

[5] International Monetary Fund. PIMA Handbook: Public Investment Management Assessment. 1st ed. Washington, DC, USA: IMF, 2022. Internet: https://www.imf.org/en/publications/books/issues/2022/07/12/pima-handbook-public-investment-management-assessment-1st-edition-50166 (accessed: 9/2026).

[6] G. Schwartz, M. Fouad, T. S. Hansen and G. Verdier, Eds., Well Spent: How Strong Infrastructure Governance Can End Waste in Public Investment. Washington, DC, USA: IMF, 2020, doi: 10.5089/9781513511818.071.

[7] Chính phủ. Nghị định số 19/2026/NĐ-CP ngày 14/01/2026 quy định về trình tự, thủ tục thẩm định dự án quan trọng quốc gia và giám sát, đánh giá đầu tư, Hà Nội, 2026.

[8] Chính phủ. Nghị định số 96/2026/NĐ-CP ngày 31/3/2026 quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật Đầu tư, Hà Nội, 2026.

[9] Bộ Tài chính. Thông tư số 44/2026/TT-BTC ngày 22/4/2026 quy định về mẫu báo cáo giám sát, đánh giá đầu tư và chế độ báo cáo trực tuyến, Hà Nội, 2026.

[10] Quốc hội. Luật Đầu tư công số 58/2024/QH15 ngày 29/11/2024, Hà Nội, 2024.

[11] Quốc hội, Luật số 90/2025/QH15 ngày 25/6/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Đầu tư công và một số luật khác, Hà Nội, 2025.

[12] Chính phủ. Nghị định số 85/2025/NĐ-CP ngày 08/4/2025 quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Đầu tư công, Hà Nội, 2025.

[13] Chính phủ. Nghị định số 275/2025/NĐ-CP ngày 18/10/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 85/2025/NĐ-CP, Hà Nội, 2025.

[14] Quốc hội. Luật Đầu tư số 143/2025/QH15 ngày 11/12/2025, Hà Nội, 2025.

[15] Quốc hội. Luật Đầu tư theo phương thức đối tác công tư số 64/2020/QH14 ngày 18/6/2020, Hà Nội, 2020.

[16] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15 ngày 26/11/2024, Hà Nội, 2024.

[17] Quốc hội. Luật số 144/2025/QH15 ngày 11/12/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, Hà Nội, 2025.

[18] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10/12/2025, Hà Nội, 2025.

[19] Bộ Xây dựng. Văn bản hợp nhất số 04/VBHN-BXD ngày 11/02/2026 hợp nhất Nghị định về quản lý đầu tư phát triển đô thị, Hà Nội, 2026. Internet: https://moc.gov.vn/Images/FileVanBan/BXD_04-VBHN-BXD_11022026.pdf (truy cập: tháng 9/2026).

[20] Chính phủ. Nghị định số 29/2021/NĐ-CP ngày 26/3/2021 quy định về trình tự, thủ tục thẩm định dự án quan trọng quốc gia và giám sát, đánh giá đầu tư, Hà Nội, 2021 (hết hiệu lực từ ngày 14/01/2026).

[21] Bộ Kế hoạch và Đầu tư. Thông tư số 05/2023/TT-BKHĐT ngày 30/6/2023 quy định về mẫu báo cáo giám sát, đánh giá đầu tư và chế độ báo cáo trực tuyến, Hà Nội, 2023.

[22] P. O'Brien, P. O'Neill, and A. Pike. Funding, financing and governing urban infrastructure. Urban Stud., 2019, doi: 10.1177/0042098018824014.

[23] E. Dabla-Norris, J. Brumby, A. Kyobe, Z. Mills and C. Papageorgiou. Investing in public investment: An index of public investment efficiency. J. Econ. Growth, vol. 17, no. 3, pp. 235-266, 2012, doi: 10.1007/s10887-012-9078-5.

[24] A. M. Ruiz Rivadeneira, T. Dekyi and L. Cruz. OECD Infrastructure Governance Indicators: Conceptual framework, design, methodology and preliminary results. OECD Working Papers on Public Governance, no. 59, OECD Publishing, Paris, France, 2023, doi: 10.1787/95c2cef2-en.

[25] J.-H. Kim, J. A. Fallov and S. M. Groom. Public Investment Management Reference Guide. Washington, DC, USA: World Bank, 2020. Internet: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/99c14858-9bf8-53e3-8fa3-67bd9b46610f (accessed: 9/2026).

[26] C. Incaltarau, G. C. Pascariu, and N.-C. Surubaru. Evaluating the determinants of EU funds absorption across old and new member states - the role of administrative capacity and political governance. J. Common Mark. Stud., vol. 58, no. 4, pp. 941-961, Jul. 2020, doi: 10.1111/jcms.12995.

[27] J. Tosun. Absorption of regional funds: A comparative analysis. J. Common Mark. Stud., vol. 52, no. 2, pp. 371-387, 2014, doi: 10.1111/jcms.12088.

[28] C. P. Pham, P. T. Nguyen and C. H. D. Nguyen. A hybrid DEMATEL-Grey system for analyzing slow disbursement causes in public infrastructure projects. Int. J. Sustain. Dev. Plan., vol. 19, no. 8, pp. 3247-3253, 2024, doi: 10.18280/ijsdp.190836.

[29] N. H. Thai, T. Q. Phu and H. T. Y. Thao. Assessing governmental roles in the success of infrastructure projects implemented through public-private partnership in Vietnam, Front. Built Environ., vol. 11, art. 1644333, 2025, doi: 10.3389/fbuil.2025.1644333.

[30] N. Krasnopeeva and A. Morozkina. Contingent liabilities of public-private partnerships (PPPs) in Russia and BRICS countries: Assessment and risk mitigation mechanisms. Int. Organ. Res. J., vol. 16, no. 4, pp. 71-89, 2021, doi: 10.17323/1996-7845-2021-04-07.

[31] World Bank. How Do Countries Measure, Manage and Monitor Fiscal Risks Generated by Public-Private Partnerships? Washington. DC, USA: World Bank, 2023. Internet: https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/485861468307741430 (accessed: 9/2026).

[32] B. A. Olken. Monitoring corruption: Evidence from a field experiment in Indonesia. J. Polit. Econ., vol. 115, no. 2, pp. 200-249, Apr. 2007, doi: https://doi.org/10.1086/517935.

[33] N. L. Hương và N. Q. Toản. Một số vấn đề cơ bản trong hoạt động giám sát dự án đầu tư xây dựng. Tạp chí Kinh tế Xây dựng, số 4, tr. 26-29, 2015.

[34] N. L. Hương, N. Q. Toản và T. T. H. Quỳnh. Sử dụng chỉ tiêu NPV, NAV và NFV trong giám sát, đánh giá dự án đầu tư. Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng, số 29, tr. 8-12, tháng 6/2016.

[35] N. Q. Toản. Vướng mắc, khó khăn về quy định pháp luật trong giám sát, đánh giá dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước: Nguyên nhân và giải pháp. Tạp chí Kinh tế xây dựng, số 1, tr. 25-31, 2019.

[36] N. Q. Toản và N. T. Đạt. Giám sát, kiểm soát dự án đầu tư xây dựng của cơ quan thanh tra, kiểm toán nhà nước. Tạp chí Xây dựng, số 3, tr. 78-83, 2022. Internet: https://vjol.info.vn/tcxd/article/view/66129 (truy cập: tháng 8/2026).

[37] Đ. T. Như, N. Q. Toản, L. T. Hằng và N. T. H. Giang. Huy động vốn cho xây dựng và phát triển đô thị: Trường hợp TP Hạ Long tỉnh Quảng Ninh. Tạp chí Xây dựng, số 12, tr. 106-111, 2024. Internet: https://vjol.info.vn/tcxd/article/view/106080 (truy cập: tháng 8/2026).

[38] N. L. Hương, N. Q. Toản, N. T. Thúy và N. C. Cường. Tăng cường công tác giám sát, đánh giá đầu tư công tại tỉnh Quảng Ninh trong giai đoạn 2021-2025. Tạp chí điện tử Xây dựng, ngày 14/01/2026. Internet: https://tapchixaydung.vn/tang-cuong-cong-tac-giam-sat-danh-gia-dau-tu-cong-tai-tinh-quang-ninh-trong-giai-doan-2021-2025-20201224000035757.html (truy cập: tháng 9/2026).

[39] T. T. K. Phú. Tính toán nguồn lực tài chính cho kế hoạch đầu tư công trung hạn ở Việt Nam - Tiếp cận dựa trên dữ liệu. Tạp chí Kinh tế châu Á - Thái Bình Dương, số 1 (702), tháng 3/2026. Internet: https://vjol.info.vn/tckinhtechauathaibinhduong/article/view/139614 (truy cập: tháng 9/2026).

[40] UBND tỉnh Lạng Sơn. Báo cáo số 84/BC-UBND ngày 03/3/2022 về giám sát và đánh giá tổng thể đầu tư năm 2021 trên địa bàn tỉnh Lạng Sơn, Lạng Sơn, 2022.

[41] UBND tỉnh Lạng Sơn. Báo cáo số 84/BC-UBND ngày 03/3/2023 về giám sát và đánh giá tổng thể đầu tư năm 2022 trên địa bàn tỉnh Lạng Sơn, Lạng Sơn, 2023.

[42] UBND tỉnh Lạng Sơn. Báo cáo số 119/BC-UBND ngày 05/3/2024 về giám sát và đánh giá tổng thể đầu tư năm 2023 trên địa bàn tỉnh Lạng Sơn, Lạng Sơn. 2024.

[43] UBND tỉnh Lạng Sơn. Báo cáo số 109/BC-UBND ngày 11/3/2025 về giám sát và đánh giá tổng thể đầu tư năm 2024 trên địa bàn tỉnh Lạng Sơn, Lạng Sơn, 2025.

[44] UBND tỉnh Lạng Sơn. Báo cáo số 126/BC-UBND ngày 09/3/2026 về giám sát và đánh giá tổng thể đầu tư năm 2025 trên địa bàn tỉnh Lạng Sơn, Lạng Sơn, 2026.

■ Ngày nộp bài: 02/10/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/10/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/10/2026

Ứng dụng AI tạo sinh trong giảng dạy và đào tạo ngành Quản lý xây dựng

Applying generative AI in teaching and training for the Construction Management field

> THS NGUYỄN HỮU VƯƠNG
Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: vuongnguyenhuu.utc@gmail.com

TÓM TẮT

Nghiên cứu xem xét cơ sở lý luận và điều kiện vận dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh (GenAI) trong giảng dạy, học tập ngành Quản lý xây dựng thông qua phân tích định lượng dữ liệu nghiên cứu gồm 372 quan sát (340 sinh viên và 32 giảng viên). Khung lý thuyết kết hợp mô hình chấp nhận công nghệ TAM/UTAUT với năng lực AI, mức độ tin cậy và nhận thức rủi ro học thuật. Bảy thang đo gồm 21 biến quan sát được phân tích thống kê mô tả, Cronbach's alpha, tương quan và hồi quy tuyến tính với sai số chuẩn vững HC3. Kết quả phân tích cho thấy Cronbach's alpha đạt 0,783 - 0,863; mô hình giải thích ý định sử dụng đạt R^2 = 0,284, trong đó tính hữu ích, tính dễ sử dụng, năng lực AI và độ tin cậy có hệ số dương, nhận thức rủi ro có hệ số âm. Hồi quy hành vi sử dụng tự báo cáo đạt R^2 = 0,244. Bài báo đã chỉ ra AI tạo sinh góp phần nâng cao chất lượng đào tạo quản lý xây dựng thông qua cá nhân hóa học tập, hỗ trợ giảng dạy, phân tích dự án và phát triển năng lực nghề nghiệp.

Từ khóa: AI tạo sinh; quản lý xây dựng; TAM; UTAUT; PLS-SEM.

ABSTRACT

This study examines the theoretical rationale and conditions for applying generative artificial intelligence (GenAI) in the teaching and learning of Construction Management, based on a quantitative analysis of data from 372 participants (340 students and 32 lecturers). The theoretical framework integrates the Technology Acceptance Model (TAM/UTAUT) with constructs related to AI competency, trust and perceived academic risk. Seven scales, comprising 21 observed variables, were analyzed using descriptive statistics, Cronbach's alpha, correlation analysis and linear regression with HC3 robust standard errors. The results show Cronbach's alpha values ranging from 0.783 to 0.863. The model for the intention to use GenAI yielded an R^2 of 0.284, with perceived usefulness, ease of use, AI competency and trust showing positive coefficients, while perceived risk showed a negative coefficient. The regression model for self-reported usage behavior yielded an R^2 of 0.244. The study demonstrates that generative AI contributes to enhancing the quality of Construction Management education by facilitating personalized learning, supporting instruction, enabling project analysis and fostering professional competency development.

Keywords: Generative AI; construction management; TAM; UTAUT; PLS-SEM.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

AI tạo sinh tạo ra văn bản, mã lệnh, hình ảnh và các dạng biểu đạt khác từ yêu cầu của người dùng. Trong giáo dục đại học, công nghệ này mở rộng khả năng cung cấp phản hồi, gợi mở câu hỏi, chuẩn bị tài liệu và tạo tình huống học tập, song kết quả đầu ra có thể thiếu căn cứ, sai bối cảnh hoặc dẫn nguồn không tồn tại [4, 11]. Đối với đào tạo quản lý xây dựng, sai lệch trong định mức, điều kiện hợp đồng, tiến độ hoặc đánh giá rủi ro đặc biệt đáng lưu ý: Một câu trả lời thuyết phục về ngôn ngữ không đồng nghĩa với phương án kỹ thuật được kiểm chứng.

Các nghiên cứu trước đây đã đề cập thái độ chấp nhận công nghệ của người học, nhưng khả năng chuyển từ việc sử dụng phổ biến sang năng lực chuyên môn có thể đánh giá vẫn là vấn đề cần kiểm tra [1-4]. Trong bối cảnh ngành Quản lý xây dựng, mục tiêu đặt ra là nhận diện những nhân tố gắn với ý định và hành vi sử dụng, đồng thời xác lập giới hạn trách nhiệm của giảng viên và sinh viên. Từ đó, bài báo xác định 3 câu hỏi nghiên cứu cụ thể như sau:

RQ1. Thực trạng ứng dụng AI tạo sinh trong giảng dạy và học tập ngành Quản lý xây dựng hiện nay như thế nào?

RQ2. Những yếu tố nào ảnh hưởng đến ý định và hành vi sử dụng AI tạo sinh của giảng viên và sinh viên?

RQ3. AI tạo sinh mang lại những lợi ích, hạn chế gì và cần giải pháp nào để nâng cao hiệu quả ứng dụng trong đào tạo quản lý xây dựng?

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ SỬ DỤNG AI TẠO SINH TRONG ĐÀO TẠO

2.1. Bản chất công nghệ và vai trò của GenAI trong hoạt động giảng dạy

Khác với phần mềm chuyên dụng hoạt động trên quy tắc tính toán và bộ dữ liệu xác định, mô hình ngôn ngữ lớn ước lượng chuỗi đầu ra từ các mẫu hình thống kê học được trong huấn luyện. Công cụ có thể diễn đạt quy trình bóc tách khối lượng, lập bảng rủi ro hoặc giải thích sơ đồ mạng, nhưng không tự chứng minh rằng khối lượng, thời gian hoặc điều khoản được tạo ra đáp ứng hồ sơ dự án cụ thể [11]. Vì vậy, cần phân biệt ba mức độ: Hỗ trợ trình bày kiến thức; hỗ trợ lập luận, phản biện; tham gia tạo sản phẩm chuyên môn có yêu cầu kiểm chứng độc lập. Ở mức cuối cùng, trách nhiệm chuyên môn phải thuộc về con người.

Ở khâu chuẩn bị, giảng viên có thể phác thảo đề cương buổi học, tạo ví dụ về dự toán, tiến độ, mô hình hợp đồng và tình huống xử lý tranh chấp. Trong triển khai học phần, hệ thống hội thoại hỗ trợ đặt câu hỏi phân tầng, giả lập vai trò chủ đầu tư - nhà thầu, phản hồi sơ bộ cho lập luận hoặc cung cấp nhiều phương án để sinh viên đối chiếu. Ở khâu đánh giá, giá trị nổi bật nằm ở thiết kế rubric và phản hồi formative, không phải giao toàn bộ chấm điểm hay kết luận năng lực cho hệ thống tự động [4, 11]. Tất cả ví dụ, nguồn và điều khoản được máy sinh ra cần có bước biên tập, hiệu đính và phê duyệt của người dạy.

Sử dụng GenAI có thể giúp người học tiếp cận những cách giải thích khác nhau, nhận phản hồi sớm và luyện đặt giả thuyết. Tuy nhiên, việc rút ngắn thời gian hoàn thành bài tập không mặc nhiên chứng tỏ hiểu sâu hơn. Trong quản lý xây dựng, sinh viên cần đối chiếu nội dung tạo sinh với hồ sơ thiết kế, dự toán, hợp đồng, tiêu chuẩn và dữ liệu dự án; ghi lại giả định; tái lập phép tính; giải thích được lý do chọn phương án. Năng lực AI vì thế bao gồm khả năng xác định nhiệm vụ phù hợp, soạn yêu cầu, kiểm tra tính đúng đắn, nhận diện thiên lệch và thực hiện nguyên tắc liêm chính [3, 4].

2.2. Sự chấp nhận công nghệ và hành vi sử dụng GenAI của người dùng

Mô hình TAM xác lập hai cấu trúc trung tâm là tính hữu ích cảm nhận (PU) và tính dễ sử dụng cảm nhận (PEOU), có thể liên hệ với thái độ và ý định sử dụng [1]. UTAUT mở rộng sang kỳ vọng hiệu quả, nỗ lực, ảnh hưởng xã hội và điều kiện thuận lợi [2]. Nghiên cứu này kế thừa PU, PEOU, bổ sung năng lực AI (AIL), độ tin cậy cảm nhận (TR), nhận thức rủi ro (PR), ý định sử dụng (BI) và hành vi sử dụng tự báo cáo (UB). TR phản ánh mức sẵn sàng tin vào kết quả có điều kiện, không tương đương độ chính xác khách quan; PR biểu thị lo ngại về đạo văn, sai số và lộ lọt dữ liệu. Các quan hệ được đặt thành giả thuyết để kiểm định, không được diễn giải như mối liên hệ nhân quả đã xác nhận.

UNESCO đặt trọng tâm vào quyền chủ động của người học, năng lực người dạy, bảo vệ dữ liệu và kiểm định mức thích hợp của công cụ theo bối cảnh [4]. Trong một học phần chuyên ngành, những nguyên tắc ấy cần chuyển thành yêu cầu cụ thể: Phân loại mức sử dụng được phép; công khai phần đóng góp của công cụ; không tải lên dữ liệu dự án có tính bảo mật; lưu bằng chứng kiểm tra nguồn; đánh giá cả quá trình tính toán lẫn sản phẩm cuối cùng. Cách quản trị này bảo đảm người học khai thác công nghệ nhưng không thay thế năng lực lập luận nghề nghiệp.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Thiết kế và dữ liệu

Bài báo sử dụng tổng hợp tài liệu lý thuyết và phân tích bộ dữ liệu khảo sát với 372 đối tượng gồm 340 sinh viên, 32 giảng viên. Bảng khảo sát gồm 21 câu trả lời với thang đo Likert 1-5 thuộc bảy cấu trúc thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Cấu trúc đo lường và giả thuyết

Thang đo	Biến quan sát	Nội dung đo
PU	PU1-PU3	Lợi ích đối với năng suất và nhiệm vụ chuyên ngành
PEOU	PEOU1-PEOU3	Mức thuận tiện trong thao tác và học cách sử dụng
AIL	AIL1-AIL3	Khả năng viết yêu cầu, đối chiếu và kiểm tra đầu ra
TR	TR1-TR3	Độ tin cậy cảm nhận có điều kiện
PR	PR1-PR3	Rủi ro sai lệch, đạo văn và dữ liệu
BI	BI1-BI3	Dự định tiếp tục sử dụng
UB	UB1-UB3	Mức sử dụng tự báo cáo

3.2. Quy trình phân tích và giới hạn kiểm định

Các thang đo được lấy trung bình ba mục, kiểm tra dữ liệu khuyết và trùng mã, tính Cronbach's alpha theo phương sai các mục. Tiếp theo là ma trận tương quan Pearson, hồi quy bình phương nhỏ nhất (OLS) và sai số chuẩn vững HC3. Mô hình có dạng:

$$BI = \beta0 + \beta1PU + \beta2PEOU + \beta3AIL + \beta4TR + \beta5PR + \varepsilon \quad (1)$$

$$UB = \gamma0 + \gamma1BI + \gamma2AIL + \gamma3PR + \upsilon \quad (2)$$

Phân tích PLS-SEM được thực hiện qua ba giai đoạn nhằm đánh giá độ tin cậy, giá trị thang đo và khả năng giải thích, dự báo của mô hình nghiên cứu.

Thứ nhất, đánh giá mô hình đo lường thông qua hệ số tải ngoài (outer loadings ≥ 0,708), Cronbach's Alpha, rho_A và độ tin cậy tổng hợp (CR từ 0,70 đến 0,95). Giá trị hội tụ được xác nhận bằng phương sai trích trung bình (AVE ≥ 0,50), trong khi giá trị phân biệt được kiểm tra bằng HTMT (dưới 0,85 hoặc 0,90).

Thứ hai, đánh giá mô hình cấu trúc thông qua hệ số VIF (ưu tiên dưới 3), hệ số đường dẫn (β) và kiểm định Bootstrapping với 5.000 mẫu lặp, sử dụng mức ý nghĩa $p < 0,05$. Hệ số R^2 phản ánh khả năng giải thích biến thiên của biến phụ thuộc; hệ số f^2 đo lường mức độ ảnh hưởng riêng của từng biến độc lập, với các ngưỡng 0,02; 0,15 và 0,35.

Thứ ba, đánh giá khả năng dự báo ngoài mẫu bằng PLSpredict, sử dụng RMSE hoặc MAE và so sánh với mô hình hồi quy tuyến tính chuẩn. Quy trình này cung cấp cơ sở kiểm định các giả thuyết về ý định và hành vi sử dụng AI tạo sinh trong đào tạo quản lý xây dựng [12].

4. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU

4.1. Mẫu và độ tin cậy nội bộ

Bộ số liệu gồm 372 phiếu khảo sát với 91,4% sinh viên và 8,6% giảng viên. Các trung bình cấu trúc xấp xỉ 3,14 - 3,22 trên thang năm mức. Giá trị Cronbach's Alpha nằm trong khoảng 0,783 - 0,863, cho thấy dữ liệu được khảo sát có tính nhất quán nội bộ, phù hợp để phân tích.

Bảng 2. Kết quả phân tích độ tin cậy thang đo

Thang đo	Điểm TB	Cronbach's alpha
PU	3,203	0,789
PEOU	3,151	0,791
AIL	3,196	0,783
TR	3,136	0,839
PR	3,220	0,863
BI	3,162	0,817
UB	3,215	0,789

4.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến ý định sử dụng và hành vi sử dụng AI tạo sinh

Kết quả hồi quy cho thấy tính hữu ích cảm nhận (PU = 0,236) và tính dễ sử dụng (PEOU = 0,228) có quan hệ tích cực với ý định sử dụng AI tạo sinh, đều đạt ý nghĩa thống kê cao ($p < 0,001$). Độ tin cậy cảm nhận (TR = 0,154; p = 0,001) và năng lực AI (AIL = 0,106; p = 0,038) cũng góp phần thúc đẩy ý định ứng dụng. Ngược lại, nhận thức rủi ro (PR = −0,246; $p < 0,001$) có quan hệ ngược chiều, phản ánh những lo ngại về độ chính xác, bảo mật thông tin và trung thực học thuật. Kết quả nhấn mạnh vai trò của lợi ích công nghệ, khả năng tiếp cận và kiểm soát rủi ro.

Tiếp theo đó, ý định sử dụng (BI = 0,385; $p < 0,001$) có quan hệ thuận chiều với hành vi sử dụng AI tạo sinh, phản ánh sự gắn kết giữa mức độ sẵn sàng và hoạt động ứng dụng công nghệ. Năng lực AI (AIL = 0,172; $p < 0,001$) cũng có quan hệ tích cực, cho thấy kỹ năng khai thác và kiểm chứng thông tin đóng vai trò quan trọng trong thực hành. Ngược lại, nhận thức rủi ro (PR = −0,052; p = 0,281) chưa có ý nghĩa thống kê. Kết quả gợi ý khả năng ý định sử dụng đóng vai trò trung gian giữa nhận thức rủi ro và hành vi.

Bảng 3. Kết quả phân tích hồi quy

Thang đo	Biến	Hệ số OLS	p (HC3)
BI	PU	0,236	<0,001
BI	PEOU	0,228	<0,001
BI	AIL	0,106	0,038
BI	TR	0,154	0,001
BI	PR	−0,246	<0,001
UB	BI	0,385	<0,001
UB	AIL	0,172	<0,001
UB	PR	−0,052	0,281

5. XU HƯỚNG ỨNG DỤNG GENAI TRONG ĐÀO TẠO QUẢN LÝ XÂY DỰNG

Kết quả phân tích cho thấy việc chấp nhận và ứng dụng AI tạo sinh trong đào tạo chịu tác động đồng thời của nhận thức về lợi ích, tính thuận tiện, rủi ro, ý định sử dụng và năng lực AI. Từ các mối quan hệ có ý nghĩa thống kê, có thể rút ra ba nhận định chính với những hàm ý thực tiễn đối với hoạt động đào tạo chuyên ngành.

Thứ nhất, nhận thức về tính hữu ích (PU) và tính dễ sử dụng (PEOU) có tác động tích cực đến ý định sử dụng (BI). Kết quả này cho thấy người học có xu hướng chấp nhận AI tạo sinh khi công nghệ hỗ trợ giải quyết các nhiệm vụ học tập cụ thể, tiết kiệm thời gian và không đòi hỏi thao tác phức tạp. Do đó, các cơ sở đào tạo cần ưu tiên tích hợp AI vào những hoạt động có giá trị chuyên môn rõ ràng như phân tích tình huống, xử lý dữ liệu, lập phương án kỹ thuật và hỗ trợ nghiên cứu. Việc triển khai cần gắn với đặc thù học phần, thay vì chỉ giới thiệu các công cụ AI theo hướng phổ thông.

Thứ hai, nhận thức về rủi ro (PR) có quan hệ âm với ý định sử dụng (BI), phản ánh những lo ngại liên quan đến độ chính xác, tính minh bạch, bảo mật thông tin và sự phụ thuộc vào công nghệ. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xác nhận được ảnh hưởng trực tiếp có ý nghĩa thống kê của PR đến hành vi sử dụng thực tế (UB). Điều này cho thấy nhận thức rủi ro có thể làm giảm mức độ sẵn sàng tiếp nhận công nghệ nhưng chưa đủ cơ sở kết luận rằng nó trực tiếp hạn chế hành vi ứng dụng. Về quản lý đào tạo, cần xây dựng quy trình kiểm chứng thông tin, hướng dẫn trích dẫn nội dung do AI hỗ trợ và xác định trách nhiệm của người học đối với sản phẩm học thuật.

Thứ ba, ý định sử dụng (BI) và năng lực AI (AIL) đều có quan hệ tích cực, có ý nghĩa thống kê với hành vi sử dụng (UB). Kết quả nhấn mạnh rằng thái độ chấp nhận công nghệ cần đi kèm năng lực vận dụng để chuyển thành hoạt động thực tế. Vì vậy, chương trình đào tạo cần phát triển đồng thời kỹ năng thiết lập yêu cầu, đánh giá đầu ra, phát hiện sai lệch và sử dụng AI có trách nhiệm. Các nội dung này nên được tích hợp vào bài tập, đồ án và hoạt động đánh giá năng lực chuyên môn.

6. KẾT LUẬN

Bài báo hệ thống hóa nền tảng lý luận về sử dụng GenAI trong đào tạo quản lý xây dựng, xác lập vai trò hỗ trợ của công nghệ và giới hạn đối với trách nhiệm học thuật, chuyên môn. Ứng dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh trong đào tạo quản lý xây dựng mang lại nhiều lợi ích về chất lượng giảng dạy, hiệu quả học tập và phát triển năng lực nghề nghiệp. Đối với giảng viên, công nghệ này hỗ trợ xây dựng học liệu, thiết kế tình huống thực tiễn, cá nhân hóa nội dung và đánh giá kết quả học tập. Đối với sinh viên, AI tạo sinh giúp tiếp cận kiến thức chuyên ngành, phân tích hồ sơ dự án, lập tiến độ, dự toán chi phí, nhận diện rủi ro và đề xuất phương án quản lý. Việc ứng dụng hợp lý còn góp phần phát triển tư duy phản biện, năng lực giải quyết vấn đề và kỹ năng số, đáp ứng yêu cầu chuyển đổi số của ngành Xây dựng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong Đề tài mã số T2026-QLXD-004.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. D. Davis. Perceived usefulness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, vol. 13, no. 3, pp. 319-340, 1989, doi:10.2307/249008.

[2] V. Venkatesh, M. G. Morris, G. B. Davis and F. D. Davis. User acceptance of information technology: Toward a unified view. MIS Quarterly, vol. 27, no. 3, pp. 425-478, 2003, doi: 10.2307/30036540.

[3] D. T. K. Ng, J. K. L. Leung, S. K. W. Chu and M. S. Qiao. Conceptualizing AI literacy: An exploratory review. Computers and Education: Artificial Intelligence, vol. 2, no. 100041, 2021, doi: 10.1016/j.caeai.2021.100041.

[4] F. Miao and W. Holmes. Guidance for Generative AI in Education and Research. UNESCO, Paris, 2023.

[5] Digital Education Council. Global AI Student Survey 2024. Digital Education Council, 2024.

[6] J. Freeman. Student Generative AI Survey 2025. Policy Note 61, Higher Education Policy Institute, 2025.

[7] R. Stephenson and C. Armstrong. Student Generative Artificial Intelligence Survey 2026. Report 199, Higher Education Policy Institute, 2026.

[8] Digital Education Council. AI in Higher Education: Global Survey 2026. Digital Education Council, 2026.

[9] T. Zhao, X. Lin and R. Na. Integrating AI in construction estimation education: A comparative study of Togal AI and Bluebeam Revu 20. European Journal of Education, vol. 60, no. 4, art. no. e70287, 2025, doi: 10.1111/ejed.70287.

[10] M. Pinto and S. Ferreira. Impact of Generative AI on Higher Education Students: ENESET Ad Hoc Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2026, doi: 10.2766/1244858.

[11] E. Kasneci et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences, vol. 103, art. no. 102274, 2023, doi: 10.1016/j.lindif.2023.102274.

[12] J. F. Hair, G. T. M. Hult, C. M. Ringle and M. Sarstedt. A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), 3rd ed. Sage, Thousand Oaks, CA, 2022.

■Ngày nhận bài: 19/10/2026 ■Ngày sửa bài: 22/10/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 05/11/2026

Các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án bất động sản xanh tại Hà Nội

Factors influencing capital mobilization for green real estate projects in Hanoi

> NGUYỄN THẢO TRANG[1], NGUYỄN THỊ THÚY[2,*]
[1]Phòng Kinh tế, Hạ tầng và Đô thị, UBND phường Yên Hòa, TP Hà Nội
[2]Khoa Kinh tế và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: thuynt3@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bất động sản (BĐS) không còn là lựa chọn mang tính tự nguyện, mà đang trở thành xu hướng tất yếu của thị trường. Hà Nội là một trong những địa phương dẫn đầu cả nước về số lượng dự án BĐS xanh, với tổng diện tích sàn được chứng nhận xanh đạt trên 4,4 triệu m^2 tính đến năm 2026. Tuy nhiên, việc phát triển các dự án BĐS xanh vẫn đối mặt với nhiều khó khăn trong huy động vốn. Nghiên cứu này nhằm xác định các nhân tố ảnh hưởng đến khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh tại Hà Nội. Phương pháp phân tích, tổng hợp tài liệu kết hợp với phỏng vấn sâu 17 chuyên gia được sử dụng để thu thập và phân tích thông tin. Kết quả nghiên cứu cho thấy cả 15 nhân tố được xem xét đều có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh. Các nhân tố này phản ánh những khía cạnh đa dạng, liên quan đến nhiều chủ thể, bao gồm nhà đầu tư, cơ quan quản lý nhà nước, ngân hàng, tổ chức tài chính và quỹ đầu tư. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ các yếu tố chi phối hoạt động huy động vốn, qua đó cung cấp cơ sở tham khảo cho việc đề xuất các giải pháp thúc đẩy huy động vốn và phát triển thị trường BĐS xanh tại Hà Nội.

Từ Khóa: Bất động sản; bất động sản xanh; huy động vốn; Hà Nội.

ABSTRACT

Real estate is increasingly becoming an essential component of market development rather than merely an optional investment choice. Hanoi is among the leading localities in Vietnam in terms of the number of green real estate projects, with a total certified green building floor area exceeding 4.4 million m^2 as of 2026. Nevertheless, the development of green real estate projects continues to face significant challenges in capital mobilization. This paper aims to identify the factors influencing capital mobilization for green real estate projects in Hanoi. The research employs a combination of document analysis and synthesis, supplemented by in-depth interviews with 17 experts to collect and analyze relevant data. The findings indicate that all 15 factors have a significant influence on capital mobilization for green real estate projects. These factors encompass multiple dimensions involving various stakeholders, including real estate developers, state management agencies, banks, financial institutions. The research results contributes to a better understanding of the determinants of capital mobilization for green real estate projects, providing an analytical basis for developing appropriate solutions to facilitate access to finance and promote the sustainable development of Hanoi's green real estate market.

Key words: Real estate; green real estate; capital mobilization; Hanoi.

1. XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN CÁC DỰ ÁN BĐS XANH TẠI HÀ NỘI

Trong những năm gần đây, phát triển BĐS xanh trở thành một xu hướng đáng chú ý của thị trường BĐS Việt Nam. Các hệ thống đánh giá và chứng nhận BĐS xanh như LEED, EDGE, LOTUS và Green Mark ngày càng được sử dụng để xác định và chứng minh mức độ đáp ứng các yêu cầu về năng lượng, nước, vật liệu, môi trường trong nhà và các tiêu chí phát triển bền vững. Các công trình xanh mang lại hiệu quả kinh tế rõ rệt như giảm 30% chi phí năng lượng, tiết kiệm 20 - 25% lượng nước, giảm 5,5% khí thải nhà kính. Những công trình có chứng nhận xanh thường được định giá cao hơn 5 - 10% và khách thuê sẵn sàng trả giá thuê cao hơn 7 - 15% [1], [7].

Xu hướng phát triển BĐS xanh tại Hà Nội thể hiện tương đối rõ qua quy mô công trình xanh và định hướng quy hoạch đô thị. Năm 2024, Hà Nội có trên 2,16 triệu m^2 diện tích công trình xanh [2]. Năm 2025, Hà Nội đạt diện tích sàn đạt chứng nhận xanh, khoảng 3,32 triệu m^2 sàn [3]. Đến tháng 9/2026, Hà Nội đứng thứ hai với 108 tòa nhà, tổng diện tích sàn đạt chứng nhận xanh 4.409.870 m^2 [4].

Quy hoạch Thủ đô Hà Nội thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 được phê duyệt tại Quyết định số 1569/QĐ-TTg xác định định hướng xây dựng Hà Nội theo hướng "Văn hiến - Văn minh - Hiện đại", xanh và thông minh; đồng thời định hướng phát triển các khu đô thị mới theo hướng xanh, thông minh, hiện đại và có hạ tầng đồng bộ [5]. Các định hướng về mở rộng không gian xanh, sử dụng năng lượng sạch, giảm phát thải, phát triển giao thông

công cộng và quản lý chất thải theo hướng hiện đại tạo ra yêu cầu ngày càng cao đối với thiết kế, xây dựng và vận hành các dự án bất động sản. Quyết định số 21/2025/QĐ-TTg ngày 04/7/2025 quy định tiêu chí môi trường và việc xác nhận dự án đầu tư thuộc danh mục phân loại xanh [6].

Tuy vậy, phát triển BĐS xanh tại Hà Nội vẫn đối mặt với một số rào cản. So với dự án thông thường, dự án xanh có thể phát sinh chi phí đầu tư ban đầu cao hơn do yêu cầu về thiết kế, vật liệu, công nghệ tiết kiệm năng lượng, hệ thống xử lý nước và chất thải, cảnh quan và các hoạt động chứng nhận. Một số giải pháp xanh có thời gian hoàn vốn dài, trong khi khả năng chuyển toàn bộ chi phí đầu tư tăng thêm vào giá bán chưa chắc được thị trường chấp nhận. Điều này tạo ra khoảng cách giữa lợi ích dài hạn của công trình xanh và áp lực tài chính trong giai đoạn đầu tư.

Hà Nội có lợi thế do tập trung hệ thống ngân hàng, tổ chức tài chính, doanh nghiệp đầu tư và nhà đầu tư trong nước và quốc tế. Đáng chú ý, dư nợ tín dụng xanh của hệ thống ngân hàng Việt Nam đến cuối năm 2024 đạt khoảng 680.000 tỷ đồng, tương đương hơn 4,3% tổng dư nợ; con số này tăng so với khoảng 620.984 tỷ đồng cuối năm 2023 [23, 24]. Sự gia tăng của tín dụng xanh cho thấy nguồn vốn gắn với mục tiêu môi trường đang từng bước được mở rộng. Tuy nhiên, nguồn vốn xanh vẫn có yêu cầu cao về tiêu chí dự án, minh bạch thông tin, chứng minh tác động môi trường và khả năng kiểm soát dòng tiền; do đó, không phải mọi dự án bất động sản đều có thể tiếp cận nguồn vốn này như nhau.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Hiện nay, nghiên cứu về BĐS xanh tại Việt Nam tập trung vào các rào cản đối với việc phát triển công trình xanh, điều kiện thể chế và các giải pháp thúc đẩy thị trường. Nguyễn và cộng sự [25] chỉ ra rằng sự phát triển công trình xanh tại Việt Nam còn gặp nhiều rào cản về thể chế, pháp lý, nhận thức và kỹ thuật; trong đó, các rào cản xã hội và nhận thức có vai trò đáng kể. Đối với hệ thống đánh giá công trình xanh, Tran và cộng sự [26] phân tích cách tiếp cận sử dụng công cụ LOTUS tại Việt Nam, qua đó cho thấy việc đánh giá công trình cần xem xét các nhóm tiêu chí kỹ thuật và môi trường phù hợp với bối cảnh trong nước. Do đó, khi xem xét các chứng nhận như LEED, EDGE, LOTUS và Green Mark, cần lưu ý rằng mỗi hệ thống có phạm vi, cấu trúc và yêu cầu đánh giá riêng; không nên mặc định số lượng hoặc mức độ đáp ứng tiêu chí giữa các hệ thống là tương đương. Về chính sách và tài chính, Nguyen và cộng sự [25] nhấn mạnh vai trò của các rào cản thể chế và thủ tục trong việc thúc đẩy công trình xanh, trong khi IFC [11] phân tích cơ hội đầu tư, vai trò của chính sách và các điều kiện tài chính cần thiết để mở rộng thị trường công trình xanh tại các nền kinh tế mới nổi.

Trần Thị Thanh Hà và Vương Minh Phương [2] phân tích thực trạng phát triển thị trường BĐS xanh tại Việt Nam và đề xuất các giải pháp về thể chế, tài chính, nhận thức cộng đồng, nhân lực và mô hình hợp tác. Ở góc độ đầu tư, Isa và cộng sự [27] cho thấy quyết định đầu tư vào văn phòng xanh có liên quan đến lợi ích kỳ vọng, khả năng tăng giá tài sản, doanh thu cho thuê, tiết kiệm chi phí, cũng như rủi ro và biến động của thị trường. Những kết quả này gợi ý rằng khả năng huy động vốn cho dự án BĐS xanh không chỉ phụ thuộc vào việc đáp ứng tiêu chí xanh mà còn liên quan đến điều kiện tiếp cận nguồn vốn, chi phí vốn, hiệu quả tài chính dự kiến và sức hấp dẫn của thị trường. Đối với chủ đầu tư, năng lực tài chính, uy tín, năng lực triển khai và tính minh bạch thông tin là những khía cạnh cần đánh giá; đối với dự án, các yếu tố quan trọng gồm quy mô đầu tư, nhu cầu vốn, tính khả thi tài chính, khả năng tạo dòng tiền và mức độ đáp ứng tiêu chí xanh.

Bảng 1. Các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh

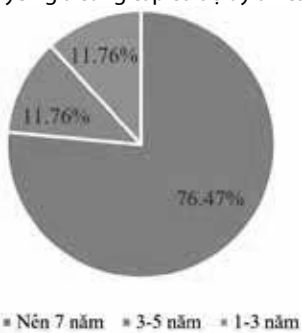
Mã hiệu	Nhân tố	Tài liệu tham khảo
NT1	Mức độ ổn định của chính sách huy động vốn	[5], [6], [17], [18]
NT2	Mức độ thuận lợi của thủ tục huy động vốn	[5], [14], [16], [17]
NT3	Mức độ ưu đãi tài chính của chính sách	[11], [17], [21], [28]
NT4	Khả năng tiếp cận tín dụng ngân hàng	[11], [18], [21], [28]
NT5	Lãi suất tín dụng	[12], [13], [18], [28]
NT6	Khả năng tiếp cận nguồn tài chính	[11], [19], [21], [28]
NT7	Thanh khoản của thị trường bất động sản	[7], [13], [22], [27]
NT8	Biến động giá bất động sản	[7], [13], [22], [27]
NT9	Khả năng tiêu thụ sản phẩm bất động sản	[1], [2], [3], [4], [7], [27]
NT10	Năng lực tài chính của chủ đầu tư	[12], [13], [28]
NT11	Uy tín của chủ đầu tư	[11], [16], [21], [28]
NT12	Minh bạch thông tin tài chính của chủ đầu tư	[15], [19], [21], [28]
NT13	Tính khả thi tài chính của dự án	[7], [12], [13], [28]
NT14	Khả năng trả nợ của dự án	[12], [13], [28]
NT15	Mức độ đáp ứng tiêu chí xanh của dự án	[6], [9], [10], [11], [21], [26], [28]

(Nguồn: Tổng hợp của nhóm nghiên cứu)

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả nghiên cứu

Phương pháp phân tích, tổng hợp tài liệu kết hợp với phỏng vấn 17 chuyên gia được sử dụng để tìm hiểu các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh tại Hà Nội. Tất cả các chuyên gia đều quan tâm và có việc trí công việc liên quan tới các dự án BĐS xanh. Trong đó 10/17 chuyên gia giữ vai trò quản lý trong các dự án. Chiếm 76,47 % (14/17 chuyên gia) có kinh nghiệm làm việc trên 7 năm, 11,76% (2/17 chuyên gia) có kinh nghiệm 3-5 năm, 11,76% (2/17 chuyên gia) có kinh nghiệm 3 năm. Các thông kê này cho thấy chất lượng thông tin chuyên gia cung cấp có độ uy tín cao.



Hình 1. Thống kê kinh nghiệm chuyên gia

(Nguồn: Tổng hợp của nhóm nghiên cứu)

3.2. Các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh tại Hà Nội

Phản ánh qua ý kiến của chuyên gia cho thấy, 15 nhân tố xem xét đều có ảnh hưởng đáng kể tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh tại Hà Nội. 15 nhân tố có sự đồng thuận cao giữa các chuyên gia (hệ số

biến thiên <=20%). Xét về giá trị trung bình, hai nhân tố uy tín của chủ đầu tư (NT11) và minh bạch thông tin tài chính của chủ đầu tư (NT12) cùng đạt 4,24 điểm, đứng ở vị trí cao nhất trong số 15 nhân tố. Tiếp theo là mức độ ổn định của chính sách huy động vốn (NT1) và lãi suất tín dụng (NT5), cùng đạt 4,18 điểm. Trong khi đó, khả năng tiếp cận nguồn tài chính (NT6) có giá trị trung bình thấp nhất, đạt 3,53 điểm; tiếp đến là mức độ thuận lợi của thủ tục huy động vốn (NT2), đạt 3,59 điểm, và mức độ ưu đãi tài chính của chính sách (NT3), đạt 3,65 điểm.

Bảng 2. Kết quả đánh giá của chuyên gia về các nhân tố ảnh hưởng đến khả năng huy động vốn cho dự án BĐS

Mã hiệu	Nhân tố	Hệ số biến thiên	Giá trị trung bình
NT1	Mức độ ổn định của chính sách huy động vốn	18,79%	4,18
NT2	Mức độ thuận lợi của thủ tục huy động vốn	19,26%	3,59
NT3	Mức độ ưu đãi tài chính của chính sách	18,67%	3,65
NT4	Khả năng tiếp cận tín dụng ngân hàng	19,39%	3,76
NT5	Lãi suất tín dụng	14,77%	4,18
NT6	Khả năng tiếp cận nguồn tài chính	19,72%	3,53
NT7	Thanh khoản của thị trường BĐS	19,39%	3,76
NT8	Biến động giá BĐS	19,17%	4,00
NT9	Khả năng tiêu thụ sản phẩm BĐS	19,39%	3,76
NT10	Năng lực tài chính của chủ đầu tư	19,17%	4,00
NT11	Uy tín của chủ đầu tư	17,24%	4,24
NT12	Minh bạch thông tin tài chính của chủ đầu tư	15,21%	4,24
NT13	Tính khả thi tài chính của dự án	16,21%	3,94
NT14	Khả năng trả nợ của dự án	19,39%	3,76
NT15	Mức độ đáp ứng tiêu chí xanh của dự án	16,14%	3,82

(Nguồn: Tổng hợp của nhóm nghiên cứu)

Theo đánh giá của 17 chuyên gia, nhóm nhân tố chính sách và pháp lý có mức điểm không đồng đều. Mức độ ổn định của chính sách huy động vốn (NT1) đạt 4,18 điểm, trong khi mức độ thuận lợi của thủ tục huy động vốn (NT2) đạt 3,59 điểm và mức độ ưu đãi tài chính của chính sách (NT3) đạt 3,65 điểm. Kết quả này cho thấy các chuyên gia đánh giá cao vai trò của tính ổn định chính sách, nhưng mức thuận lợi của thủ tục và mức độ ưu đãi tài chính chưa được đánh giá tương đương. Với dự án BĐS xanh có thời gian chuẩn bị và thu hồi vốn dài, sự ổn định của quy định có thể giúp chủ đầu tư dự báo nghĩa vụ tuân thủ và lập kế hoạch huy động vốn; ngược lại, thủ tục phức tạp hoặc ưu đãi chưa rõ ràng có thể làm tăng chi phí giao dịch và kéo dài thời gian chuẩn bị dự án.

Khung pháp lý liên quan đến lĩnh vực này đang tiếp tục được hoàn thiện. Luật Kinh doanh BĐS số 29/2023/QH15 có hiệu lực từ ngày 01/01/2025, thay thế khung luật trước đó; đồng thời, Quyết định số 21/2025/QĐ-TTg được ban hành ngày 04/07/2025 và có hiệu lực từ ngày 22/08/2025, quy định tiêu chí môi trường và việc xác nhận dự án đầu tư thuộc danh mục phân loại xanh [14, 6]. Các văn bản này tạo cơ sở để chuẩn hóa thông tin pháp lý của dự án và xem xét tính phù hợp với yêu cầu phát triển xanh. Tuy nhiên, việc một dự án đáp ứng điều kiện pháp lý chung không đồng nghĩa dự án tự động đủ điều kiện nhận tín dụng xanh; khả năng tiếp cận vốn còn phụ thuộc tiêu chí của tổ chức tài trợ, hồ sơ dự án và năng lực trả nợ.

Theo đánh giá của các chuyên gia, NT2 và NT3 có điểm trung bình thấp hơn NT1, lần lượt là 3,59 và 3,65 điểm. Đây là tín hiệu cần xem xét khi thiết kế chính sách hỗ trợ: ngoài việc ban hành định hướng, cần làm rõ quy trình thực hiện, tiêu chí xác định dự án xanh, trách nhiệm xác nhận và điều kiện hưởng ưu đãi. Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 tại Quyết định số 1658/QĐ-TTg là một định hướng chính sách quan trọng [17]. Dù vậy, không nên diễn giải điểm khảo sát thấp hơn thành bằng chứng rằng chính sách hiện hành không hiệu quả; kết quả chỉ phản ánh mức đánh giá của nhóm chuyên gia được phỏng vấn. Như vậy, trong nhóm chính sách và pháp lý, NT1 là nhân tố được đánh giá cao nhất (4,18 điểm), còn NT2 (3,59 điểm) và NT3 (3,65 điểm) có điểm thấp hơn. Theo ý kiến chuyên gia, kết quả này gợi ý cần quan tâm đồng thời đến tính ổn định của chính sách, tính thuận lợi của thủ tục và tính cụ thể của cơ chế hỗ trợ khi xây dựng giải pháp huy động vốn cho dự án BĐS xanh tại Hà Nội.

Lãi suất tín dụng (NT5) đạt 4,18 điểm; khả năng tiếp cận tín dụng ngân hàng (NT4) đạt 3,76 điểm; trong khi khả năng tiếp cận nguồn tài chính (NT6) đạt 3,53 điểm, thấp nhất trong 15 nhân tố được khảo sát. Kết quả này cho thấy chi phí tín dụng được đánh giá là vấn đề đáng chú ý, còn việc tiếp cận các nguồn tài chính ngoài hoặc bên cạnh các kênh hiện có có thể vẫn là thách thức đối với dự án. Điểm NT5 ở mức 4,18 cho thấy các chuyên gia chú trọng đến chi phí tín dụng.

Bên cạnh tín dụng ngân hàng, trái phiếu xanh, khoản vay xanh, khoản vay liên kết bền vững và tiền gửi xanh có thể giúp đa dạng hóa nguồn vốn, nhưng mỗi công cụ có điều kiện phát hành hoặc cấp vốn riêng. BIDV cho biết đến ngày 31/12/2024, dư nợ tín dụng xanh của ngân hàng đạt 80.870 tỷ đồng; đồng thời ngân hàng đã phát hành hai đợt trái phiếu xanh và trái phiếu bền vững với tổng quy mô 5.500 tỷ đồng [29]. Những con số này là ví dụ về quy mô triển khai tại một ngân hàng, không phải số liệu của toàn thị trường và cũng không đồng nghĩa toàn bộ nguồn vốn đó dành cho BĐS xanh.

Theo đánh giá của các chuyên gia, NT6 có điểm trung bình 3,53, thấp hơn NT4 và NT5. Một cách diễn giải thận trọng là việc mở rộng khả năng tiếp cận các kênh vốn đa dạng vẫn là vấn đề cần quan tâm. Mức độ tiếp cận thực tế còn phụ thuộc quy mô dự án, năng lực tín dụng của chủ đầu tư, tài sản bảo đảm, chất lượng hồ sơ và khả năng đo lường kết quả môi trường. Vì vậy, không nên đồng nhất sự gia tăng của tín dụng xanh ở cấp ngân hàng với việc mọi dự án BĐS xanh đều dễ dàng tiếp cận nguồn vốn.

Tóm lại, trong nhóm thị trường tài chính, lãi suất tín dụng (NT5) được đánh giá ở mức 4,18 điểm, khả năng tiếp cận tín dụng ngân hàng (NT4) đạt 3,76 điểm và khả năng tiếp cận nguồn tài chính (NT6) đạt 3,53 điểm. Theo ý kiến chuyên gia, giải pháp huy động vốn cần vừa kiểm soát chi phí vốn, vừa đa dạng hóa nguồn tài trợ và nâng cao khả năng đáp ứng yêu cầu thẩm định của các tổ chức cung cấp vốn.

Biến động giá có thể làm thay đổi giá trị tài sản bảo đảm, kỳ vọng doanh thu và hiệu quả tài chính dự kiến của dự án. Khi giá thị trường biến động mạnh, bên cho vay và nhà đầu tư có thể thận trọng hơn trong việc xác định giá trị tài sản, tỷ lệ cho vay hoặc mức sinh lời kỳ vọng. Điểm NT8 đạt 4,00 cho thấy các chuyên gia xem đây là nhân tố đáng lưu ý. Tuy nhiên, khảo sát không xác định chiều tác động cụ thể của biến động giá trong mọi tình huống; tác động thực tế có thể khác nhau tùy chu kỳ thị trường, phân khúc và vị trí dự án.

Thanh khoản thị trường (NT7) đạt 3,76 điểm. Về cơ chế, khả năng chuyển nhượng tài sản và tốc độ giao dịch có thể ảnh hưởng đến kỳ vọng thu hồi vốn, khả năng xử lý tài sản bảo đảm và quyết định đầu tư. Khi thanh khoản giảm, thời gian bán sản phẩm có thể kéo dài, làm chậm dòng tiền và gây áp lực lên nghĩa vụ trả nợ. Điểm khảo sát cho thấy nhân tố này được chuyên gia đánh giá là có liên quan đến huy động vốn, nhưng chưa đủ để định lượng mức độ tác động thực tế.

Khả năng tiêu thụ sản phẩm BĐS (NT9) cũng đạt 3,76 điểm. Đối với dự án xanh, khả năng bán hoặc cho thuê sản phẩm phụ thuộc không chỉ vào mức độ đáp ứng tiêu chí môi trường mà còn vào vị trí, giá bán/giá thuê, chất lượng tiện ích, niềm tin của khách hàng và khả năng

chi trả. Nếu khách hàng chưa sẵn sàng trả thêm cho các lợi ích xanh, chủ đầu tư có thể khó chuyển phần chi phí đầu tư tăng thêm thành doanh thu. Do đó, việc chứng minh nhu cầu thị trường và xây dựng phương án tiêu thụ có tính khả thi là cơ sở quan trọng trong hồ sơ huy động vốn.

Đối với Hà Nội, nhu cầu nhà ở, văn phòng và các khu đô thị chất lượng cao tạo ra cơ hội cho sản phẩm xanh, nhưng không nên mặc định mọi dự án có chứng nhận xanh đều có thanh khoản hoặc mức giá cao hơn. Cần đánh giá theo phân khúc, vị trí, giá, tiến độ bàn giao và khả năng hấp thụ thực tế. Những thông tin này giúp tổ chức cấp vốn xem xét thận trọng hơn về doanh thu dự kiến, thời điểm thu hồi vốn và khả năng trả nợ.

Như vậy, trong nhóm thị trường bất động sản, NT8 (biến động giá) có điểm trung bình 4,00, cao hơn NT7 (thanh khoản) và NT9 (khả năng tiêu thụ), cùng đạt 3,76. Theo đánh giá của chuyên gia, các điều kiện thị trường cần được xem xét cùng với phương án dòng tiền của dự án, thay vì chỉ dựa vào chứng nhận xanh hoặc kỳ vọng tăng giá.

Năng lực tài chính của chủ đầu tư (NT10) đạt 4,00 điểm. Năng lực này có thể được xem xét thông qua vốn chủ sở hữu, khả năng thanh toán, cơ cấu nợ, lịch sử dòng tiền và khả năng bố trí vốn đối ứng. Đối với dự án xanh có thời gian đầu tư dài, chủ đầu tư cần chứng minh khả năng duy trì nguồn lực trong các giai đoạn xây dựng và vận hành, đồng thời quản lý rủi ro phát sinh chi phí. Điểm 4,00 phản ánh mức đánh giá tương đối cao của nhóm chuyên gia, nhưng không thay thế cho việc thẩm định báo cáo tài chính của từng doanh nghiệp.

Uy tín của chủ đầu tư (NT11) đạt 4,24 điểm. Uy tín có thể được hình thành từ lịch sử thực hiện dự án, khả năng đáp ứng tiến độ và chất lượng, việc thực hiện nghĩa vụ với khách hàng và đối tác, cũng như kinh nghiệm quản lý các yêu cầu kỹ thuật của công trình xanh. Theo góc nhìn của bên cấp vốn, lịch sử thực hiện cam kết có thể làm giảm bất cân xứng thông tin và hỗ trợ đánh giá rủi ro thực hiện. Tuy nhiên, uy tín cần được xem xét bằng bằng chứng như hồ sơ dự án, báo cáo kiểm toán, thông tin công bố và lịch sử nghĩa vụ, thay vì chỉ dựa vào danh tiếng.

Tính minh bạch thông tin tài chính của chủ đầu tư (NT12) cũng đạt 4,24 điểm. Đây là điểm trung bình cao nhất cùng với NT11. Thông tin đầy đủ, nhất quán và có thể kiểm chứng giúp ngân hàng, nhà đầu tư đánh giá nguồn vốn, chi phí, dòng tiền dự kiến, nghĩa vụ nợ và các rủi ro của dự án. Đối với nguồn tài chính xanh, bên tài trợ còn có thể cần thông tin về mục đích sử dụng vốn, tiêu chí môi trường và kết quả thực hiện. BIDV cho biết các khung trái phiếu xanh và trái phiếu bền vững của ngân hàng được xây dựng theo chuẩn mực quốc tế, với quy trình lựa chọn dự án, quản lý nguồn vốn và báo cáo [29]. Đây là minh họa về tầm quan trọng của quản trị và báo cáo, không phải bằng chứng rằng mọi dự án đều được tài trợ.

Khả năng đa dạng hóa nguồn vốn có thể hỗ trợ chủ đầu tư giảm sự phụ thuộc vào một kênh, nhưng việc kết hợp vốn chủ sở hữu, tín dụng ngân hàng, trái phiếu, hợp tác đầu tư và tài chính xanh đòi hỏi năng lực lập kế hoạch, quản trị và công bố thông tin. Kết quả khảo sát hiện lượng hóa ba nhân tố NT10–NT12; do đó, không nên trình bày đa dạng hóa nguồn vốn như một nhân tố độc lập trong bộ 15 nhân tố nếu nó chưa được đo lường riêng.

Tóm lại, trong nhóm chủ đầu tư, NT11 và NT12 cùng đạt 4,24 điểm, cao nhất trong 15 nhân tố; NT10 đạt 4,00 điểm. Theo đánh giá của chuyên gia, uy tín và tính minh bạch là những nội dung cần ưu tiên khi chuẩn bị hồ sơ huy động vốn. Hàm ý thực tiễn là chủ đầu tư cần chuẩn hóa báo cáo tài chính, công khai thông tin dự án phù hợp quy định, chứng minh lịch sử triển khai và xây dựng cơ chế báo cáo sử dụng vốn.

Tính khả thi tài chính của dự án (NT13) đạt 3,94 điểm. Khi thẩm định, bên cấp vốn thường xem xét tổng mức đầu tư, tiến độ giải ngân, doanh thu dự kiến, chi phí vận hành, dòng tiền, thời gian hoàn vốn và các chỉ tiêu như NPV, IRR. Các giả định cần được kiểm tra theo kịch bản cơ sở và kịch bản bất lợi, nhất là đối với dự án có thời gian phát triển dài hoặc phụ thuộc vào tiến độ bán hàng. Điểm 3,94 phản ánh đánh giá của chuyên gia về tầm quan trọng của tính khả thi tài chính, không phải kết quả tính toán hiệu quả của một dự án cụ thể.

Khả năng trả nợ của dự án (NT14) đạt 3,76 điểm. Nhân tố này gắn với quy mô và thời điểm phát sinh dòng tiền, lịch trả nợ, lãi suất, thời gian ân hạn và khả năng chịu đựng khi doanh thu thấp hơn dự kiến. Với dự án xanh, việc lựa chọn kỳ hạn vốn phù hợp với tiến độ xây dựng và thời gian tạo dòng tiền có thể giúp giảm áp lực thanh khoản. Dù điểm NT14 thấp hơn NT13, điều này không có nghĩa khả năng trả nợ kém quan trọng; điểm số chỉ thể hiện mức đánh giá tương đối trong nhóm 15 nhân tố.

Mức độ đáp ứng tiêu chí xanh của dự án (NT15) đạt 3,82 điểm. Các hệ thống như LEED, EDGE, LOTUS và Green Mark có phạm vi và phương pháp đánh giá riêng; vì vậy, chủ đầu tư cần xác định rõ mục tiêu chứng nhận, chi phí đáp ứng, hồ sơ kỹ thuật và cơ chế theo dõi hiệu quả môi trường.

Tóm lại, trong nhóm đặc điểm dự án, NT13 đạt 3,94 điểm, NT15 đạt 3,82 điểm và NT14 đạt 3,76 điểm. Theo đánh giá của các chuyên gia, phương án tài chính có thể kiểm chứng, dòng tiền phù hợp với nghĩa vụ nợ và hồ sơ chứng minh tiêu chí xanh là các nội dung cần được chuẩn bị đồng bộ khi huy động vốn cho dự án BĐS xanh tại Hà Nội.

Tổng hợp các nhận định của chuyên gia về thuận lợi và khó khăn khi huy động vốn thể hiện tại Bảng 3. Vốn chủ sở hữu tạo sự chủ động nhưng có giới hạn về quy mô; tín dụng ngân hàng có khả năng cung cấp nguồn vốn lớn nhưng đi kèm điều kiện vay và áp lực trả nợ. Vốn khách hàng hỗ trợ dòng tiền nhưng phụ thuộc vào sức mua và niềm tin thị trường. Trong khi đó, hợp tác đầu tư, FDI và tài chính xanh có thể giúp đa dạng hóa nguồn lực, song đòi hỏi cao hơn về năng lực chủ đầu tư, tính khả thi và tính minh bạch của dự án.

Bảng 3. Tổng hợp thuận lợi và khó khăn của các nguồn vốn

Nguồn vốn	Thuận lợi được đề cập	Khó khăn được đề cập
Vốn chủ sở hữu	Chủ động trong quyết định đầu tư; không chịu áp lực trả lãi định kỳ; tạo nền tảng tiếp cận nguồn vốn khác	Quy mô vốn có hạn; chi phí cơ hội cao; rủi ro tập trung vào chủ đầu tư
Tín dụng ngân hàng	Có khả năng cung cấp nguồn vốn tương đối lớn; bổ sung vốn cho dự án	Lãi suất và áp lực trả nợ; điều kiện vay và tài sản bảo đảm; phụ thuộc chính sách tín dụng
Vốn huy động từ khách hàng	Hỗ trợ dòng tiền; giảm nhu cầu vay vốn; phản ánh nhu cầu thị trường	Phụ thuộc sức mua, niềm tin khách hàng, uy tín chủ đầu tư và điều kiện pháp lý mở bán
Trái phiếu doanh nghiệp	Có thể huy động vốn quy mô lớn, linh hoạt về kỳ hạn	Chi phí vốn; áp lực đáo hạn; yêu cầu cao về năng lực tài chính
Hợp tác đầu tư và liên doanh	Chia sẻ rủi ro; kết hợp nguồn lực và năng lực triển khai	Mâu thuẫn điều hành, phân chia lợi ích và thủ tục hợp tác
Vốn đầu tư trực tiếp nước ngoài (FDI)	Bổ sung nguồn lực; có thể nâng cao năng lực cạnh tranh	Yêu cầu cao về uy tín, năng lực triển khai và thủ tục đầu tư
Các nguồn tài chính xanh	Có thể thu hút nhà đầu tư quan tâm đến ESG và mục tiêu môi trường	Yêu cầu thẩm định, chứng minh tiêu chí xanh và minh bạch thông tin; khả năng tiếp cận còn hạn chế

(Nguồn: Tổng hợp của nhóm nghiên cứu)

4. KẾT LUẬN

Thị trường BĐS xanh tại Việt Nam nói chung, tại Hà Nội nói riêng đang phát triển mạnh mẽ nhờ những lợi ích nổi bật về kinh tế, môi trường và xã hội. Hà Nội đứng thứ 2 toàn quốc về phát triển BĐS xanh với nhiều dự án văn phòng, trung tâm thương mại và công trình công cộng đạt chứng nhận xanh. Một trong vấn đề được đánh giá là khó khăn rất lớn với các dự án BĐS xanh là vấn đề huy động vốn. Kết quả nghiên cứu cho thấy 15 nhân tố xem xét đều có ảnh hưởng rõ nét tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh. Giá trị trung bình của các nhân tố dao động từ 3,53 đến 4,24. Nhóm nhân tố liên quan đến uy tín, tính minh bạch của chủ đầu tư và sự ổn định của chính sách huy động vốn có giá trị trung bình nổi bật. Số liệu được tổng kết từ 17 chuyên gia, không nên được hiểu là đại diện về mặt thống kê cho tất cả các dự án BĐS xanh tại Hà Nội. Tuy nhiên, các kết quả của đề tài có thể mở rộng phân tích sang các mẫu lớn hơn và đa dạng hơn để đánh giá rõ ràng hơn về các nhân tố ảnh hưởng tới khả năng huy động vốn cho các dự án BĐS xanh tại Hà Nội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Kiên, T. N. V. C. Xu thế phát triển bất động sản xanh bền vững. Báo Nhân Dân, 2025. Internet: https://nhandan.vn/xu-the-phat-trien-bat-dong-san-xanh-ben-vung-post929331.html (truy cập: tháng 9/2026).

[2] Trần Thị Thanh Hà và Vương Minh Phương. Phát triển thị trường bất động sản xanh tại Việt Nam: Thực trạng và giải pháp. Tạp chí điện tử Kinh tế - Tài chính, 2025. https://nghiencuu.tapchikinhtetaichinh.vn/phat-trien-thi-truong-bat-dong-san-xanh-tai-viet-nam-thuc-trang-va-giai-phap-135946.html (truy cập: tháng 9/2026).

[3] Phong, D. Phát triển công trình xanh toàn diện trên địa bàn Thủ đô. Báo Xây dựng, 2026. Internet: https://baoxaydung.vn/phat-trien-cong-trinh-xanh-toan-dien-tren-dia-ban-thu-do-192260314164659841.htm (truy cập: tháng 10/2026).

[4] Khánh, N. (n.d.). Việt Nam có hơn 23 triệu m^2 sàn đạt chứng nhận xanh. Tạp chí Xây dựng, 2026. Internet: https://tapchixaydung.vn/viet-nam-co-hon-23-trieu-m-san-dat-chung-nhan-xanh-20201224000041483.html (truy cập: tháng 10/2026).

[5] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1569/QĐ-TTg ngày 12/12/2024 phê duyệt Quy hoạch Thủ đô, Hà Nội thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2024.

[6] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 21/2025/QĐ-TTg ngày 4/7/2025 quy định tiêu chí môi trường và việc xác nhận dự án đầu tư thuộc danh mục phân loại xanh, 2025.

[7] Eichholtz, P. M. A., Kok, N., & Quigley, J. M. The economics of green building. Review of Economics and Statistics, vol. 95, no. 1, pp. 50-63, 2013.

[8] Hes, D. Facilitating green building: Turning observation into practice. Palgrave Macmillan, 2005.

[9] Lee, W. L. A comprehensive review of metrics of building environmental assessment schemes. Energy and Buildings, 62, pp. 403-413. 2013. Internet https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.014 (accessed: 10/2026).

[10] U.S. Green Building Council. (n.d.). LEED v4.1. Internet: https://www.usgbc.org/leed/v41 (accessed: 10/2026).

[11] International Finance Corporation. Green buildings: A finance and policy blueprint for emerging markets. World Bank Group. 2019, Internet: https://www.ifc.org/en/insights-reports/2019/green-buildings-report (accessed: 10/2026).

[12] Brealey, R. A., Myers, S. C., Allen, F., & Edmans, A. Principles of corporate finance (14th ed.). McGraw Hill. 2023.

[13] Ross, S. A., Westerfield, R. W., Jaffe, J. F., & Jordan, B. D. Corporate finance (13th ed.). McGraw Hill, 2022.

[14] Quốc hội. Luật Kinh doanh bất động sản số 29/2023/QH15, 2023. Internet: https://chinhphu.vn/?docid=209624&pageid=27160 (truy cập: tháng 10/2026).

[15] Organisation for Economic Co-operation and Development. ESG investing and climate transition: Market practices, issues and policy considerations. OECD Publishing, 2021. Internet: https://www.oecd.org/finance/esg-investing-and-climate-transition.htm (accessed: 10/2026).

[16] International Finance Corporation. Performance standards on environmental and social sustainability, 2012. Internet: https://www.ifc.org/en/insights-reports/2012/ifc-performance-standards (accessed: 10/2026).

[17] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1658/QĐ-TTg ngày 01/10/2021 phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. 2021.

[18] Ngân hàng Nhà nước Việt Nam. Quyết định số 1604/QĐ-NHNN về việc phê duyệt Đề án phát triển ngân hàng xanh tại Việt Nam, 2018.

[19] International Capital Market Association. Green bond principles: Voluntary process guidelines for issuing green bonds. 2021. Internet: https://www.icmagroup.org/assets/documents/Sustainable-finance/2021-updates/Green-Bond-Principles-June-2021-140621.pdf (accessed: 10/2026).

[20] Asian Development Bank. Green finance strategies for accelerating green growth in Asia and the Pacific, 2021.

[21] International Finance Corporation. Building green: Sustainable construction in emerging markets, 2023. Internet: https://www.ifc.org/en/insights-reports/2023/building-green-in-emerging-markets (accessed: 10/2026).

[22] Nareit. REIT Industry Financial Snapshot, 2024. Internet: https://www.reit.com/data-research/reit-market-data/report/reit-industry-financial-snapshot (accessed: 10/2026).

[23] Hạ Chi. Nắn dòng tín dụng xanh. Thời báo Ngân hàng, 23/4/2024. Internet: https://thoibaonganhang.vn/nan-dong-tin-dung-xanh-151032.html (truy cập: tháng 9/2026).

[24] Thu Thủy. Gỡ vướng, khơi dòng tín dụng xanh. Báo Nhân Dân cuối tuần, ngày 09/3/2025.

[25] Nguyen, H.-T., Skitmore, M., Gray, M., Zhang, X., & Olanipekun, A. O. Will green building development take off? An exploratory study of barriers to green building in Vietnam. Resources, Conservation and Recycling, 127, pp. 8-20, 2017. Internet: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.012.

[26] Tran, C. N. N., Pham, P. T., Tran, T. T. M., Tam, V. W. Y., & Illankoon, I. C. S. A practical approach to promoting sustainable development in the construction industry through the use of the LOTUS-Vietnamese green-building assessment tool. International Journal of Construction Management, vol. 25, no. 11, pp. 1288-1299, 2025. Internet: https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2411087.

[27] Isa, M., Megat Abd. Rahman, M. M. G., Sipan, I., & Ting, K. H. Factors affecting green office building investment in Malaysia. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 105, pp. 138-148, 2013. Internet: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.015.

[28] International Finance Corporation. Sustainable buildings finance reference guide, 2025. Internet: https://www.ifc.org/en/insights-reports/2025/sustainable-buildings-finance-reference-guide (accessed: 10/2026).

[29] Ngân hàng TMCP Đầu tư và Phát triển Việt Nam (BIDV). Kết nối cộng đồng doanh nghiệp cùng hành động vì tương lai xanh, 2025. Internet: https://bidv.com.vn/bidv/tin-tuc/thong-tin-bao-chi/ket-noi-cong-dong-doanh-nghiep-cung-hanh-dong-vi-tuong-lai-xanh (truy cập: 10/2026).

[30] Ngân hàng TMCP Đầu tư và Phát triển Việt Nam (BIDV). BIDV dành 10.000 tỷ đồng tài trợ các dự án công trình xanh, 2024. Internet: https://bidv.com.vn/bidv/tin-tuc/tin-ve-bidv/bidv-danh-10000-ty-dong-tai-tro-cac-du-an-cong-trinh-xanh (truy cập: 10/2026).

■Ngày nhận bài: 27/7/2026 ■Ngày sửa bài: 10/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/8/2026

Takt planning for apartment fit out and MEP works in Vietnamese high rise housing, an ex ante comparison for Fhome+ Hung Loc Tower C1

Lập kế hoạch thi công takt cho công tác hoàn thiện và cơ điện căn hộ nhà chung cư cao tầng tại Việt Nam, so sánh trước cho tòa C1 Fhome+ Hưng Lộc

> NGUYEN HOANH
Lecturer, Faculty of Mechanical - Automotive and Civil Engineering, Electric Power University
Email: hoanhn@epu.edu.vn

ABSTRACT

This paper asks what takt adds to the floor by floor sequencing already used on Vietnamese sites for apartment fit out and MEP works. The case is Tower C1 of Fhome+ Hung Loc, a social housing building with 612 apartments on 17 typical floors, divided into six zones per floor. A takt plan of 16 wagons with a four day takt, run as two trains, is compared with line of balance plans using the same assumed labour of about 56,000 worker days and finishing no later. Under this assumption, batch size has the largest effect. A plan in six floor batches needs a peak of 488 workers and reaches its first handover inspection on day 199, against 290 workers and day 64 for takt. Crew balance comes second. With crews sized in proportion to labour, floor by floor sequencing needs 264 to 322 workers and starts handover between days 57 and 94, depending on the overlap rule between successive trades. Takt therefore shows no systematic planning advantage over balanced floor by floor sequencing and reserves about 7% more crew days than the balanced floor by floor plan. Its value lies in enforcing crew balance and a fixed rhythm for control, crew commitments and inspections. A 10% labour overrun with unchanged crews extends the takt plan from 264 to 330 working days, although the relative findings hold for up to twice the assumed labour.

Keywords: Takt planning; lean construction; social housing; fit out works; labour only subcontracting; line of balance; batch size; Vietnam.

TÓM TẮT

Bài báo đặt câu hỏi takt bổ sung được gì so với cách thi công cuốn chiếu từng tầng đang dùng trên công trường Việt Nam cho công tác hoàn thiện và cơ điện căn hộ. Tình huống nghiên cứu là tòa C1 dự án nhà ở xã hội Fhome+ Hưng Lộc, gồm 612 căn hộ trên 17 tầng điển hình, mỗi tầng chia sáu vùng. Kế hoạch takt 16 toa (mỗi toa là một nhóm công việc do một tổ đội đảm nhận), nhịp bốn ngày, chạy hai chuỗi song song, được so sánh với các kế hoạch đường cân bằng dùng cùng khối lượng công giả định khoảng 56.000 ngày công và hoàn thành không muộn hơn. Với giả định này, kích thước đợt có ảnh hưởng lớn nhất. Kế hoạch theo đợt sáu tầng cần quân số đỉnh 488 người và đạt lần nghiệm thu bàn giao đầu tiên ở ngày thứ 199, so với 290 người và ngày thứ 64 của takt. Cân bằng tổ đội đứng thứ hai. Khi tổ đội được bố trí tỷ lệ với khối lượng, cuốn chiếu cần 264 đến 322 người và bắt đầu bàn giao từ ngày thứ 57 đến 94, tùy quy tắc gối đầu giữa các tổ đội kế tiếp. Như vậy takt không có lợi thế hệ thống về kế hoạch so với cuốn chiếu cân bằng và phải giữ thêm khoảng 7% ngày công so với kế hoạch cuốn chiếu cân bằng. Giá trị của takt nằm ở việc bắt buộc cân bằng tổ đội và giữ nhịp cố định để kiểm soát, ràng buộc cam kết tổ đội và lập lịch nghiệm thu. Khối lượng công tăng 10% mà giữ nguyên quân số thì kế hoạch takt kéo dài từ 264 lên 330 ngày làm việc, tuy các kết luận tương đối vẫn giữ khi khối lượng gấp tới hai lần giả định.

Từ khóa: Takt; xây dựng tinh gọn; nhà ở xã hội; công tác hoàn thiện; khoán nhân công; biểu đồ đường cân bằng; kích thước đợt; Việt Nam.

1. INTRODUCTION

Construction can be managed not only as conversion activities but also as flows of work, materials and information between them [1]. Takt planning applies this idea by giving each trade the same fixed time, the takt time, to complete its work in each zone of equal work, so that trades form a train of wagons advancing one zone per takt [2, 3]. Takt shares its location logic with line of balance scheduling, which does not impose one rhythm on all trades [4].

Flow indicators proposed in a conceptual study for both favour one location per trade and low work in process [5], in line with the general relation between batch size, work in process and throughput time [6].

Evidence on takt comes mainly from Europe and North America. A multiple case study in Finland found a positive effect on location flow but contradictory effects on trade flow, and substantial effort in planning and control [7]. Two residential projects in Ireland reported shorter cycle times and better adherence to dates when takt complemented the Last Planner System [8]. Takt does not suit every project [9]. In apartment renovation a uniform production rate was hard to keep, and schedule sensitivity and buffers were recommended [10, 11]. In a residential complex, plastering productivity was 19% higher under a takt schedule than under non takt schedules [12], and for a high rise residential project, simulated takt time planning with adjusted labour assignments shortened the duration by 20.2% without overtime or extra workers [13]. A discrete event simulation comparing takt with an early start CPM schedule and with a location based schedule carrying time buffers found faster and less variable completion under takt, provided that the capacity buffer it requires does not become a cost sink when work is not made ready [14]. Many takt projects, however, fail to hold a homogeneous takt in execution [7, 10]. Five preconditions follow, namely balanced zones [3], crew capacity matched to the takt [10], reliable handoffs protected by buffers [11], frequent control [7], and supply that follows the rhythm [1]. Barriers reported for trade contractors, including multilayer subcontracting and high turnover [15], suggest that crew capacity and handoffs are the most fragile in labour intensive markets.

In the author's experience, contractors already sequence finishing works floor by floor, a practice called cuốn chiếu, although schedules are also drawn by batches of floors, and the work is done by labour only crews paid for measured quantities. Research on lean construction by Vietnamese authors has addressed waste awareness [16], lean tool prioritisation for construction supply chains [17], and simulation of marble floor finishing in Vietnam, where smaller batches and multiskilled teams were applied to reduce waste [18], and the author found no study of takt in Vietnamese housing.

The paper addresses one research question and two derived aims. RQ1 asks which planning differences between takt and conventional plans are due to the method rather than to batch size or crew balance, and is answered by the plan comparison. From that answer and from local practice, the paper then formulates propositions on where practice is likely to conflict with takt (Aim 2) and design implications for how a takt plan should be configured and adapted (Aim 3). Aims 2 and 3 are proposals for later testing and are not tested empirically in this paper.

2. RESEARCH CONTENT AND METHODS

2.1. Local practice and propositions

On many residential projects the main contractor has few direct workers. Finishing labour comes from crews whose team leaders recruit workers, often from one home province, sign labour only contracts and are paid for accepted quantities. MEP works go to specialist subcontractors. Team leaders move workers between trades, floors and sites at their discretion. Decree No. 207/2026/NĐ-CP, effective from 1 July 2026, requires quality management through acceptance and handover and keeps the main contractor responsible for subcontracted work [19, 20]. C1 started before that date and falls under the transitional provisions, but acceptance of concealed works before covering applies under both the new and the replaced decree. Meanwhile Decree No. 210/2026/NĐ-CP lets contract parties agree on the method, documents and conditions of payment [21]. From this practice, six propositions were formulated (Table 1). They are based on professional observation and require empirical testing. P2 and P6 restate, in the terms of labour only contracting, the payment and commitment clauses that a conceptual study proposed for takt subcontracts [22]; that study has not been tested in a labour only market either.

Table 1. Propositions on conflicts between takt and Vietnamese practice

No.	Takt precondition	Local practice	Expected conflict	Proposed adaptation
P1	Crew capacity matched to takt	Team leaders size and move crews	Unbalanced and variable crews	Minimum crew per wagon with a named core team
P2	Zone completed before moving on	Payment by measured quantity	Crews spread and leave tails	Payment per accepted zone with a bonus for handoff on takt
P3	Reliable handoffs	Acceptance of concealed works on request	Waiting for inspection	Inspection scheduled as a wagon
P4	Supply follows the rhythm	Owner supplied materials in large lots	Shortages or clutter	Materials kitted per zone one takt ahead
P5	Continuous production	Absence at harvest and Tết	Loss of capacity	Planned stop of the whole train
P6	Commitments by those who work	Several subcontracting layers	Commitments made off site	Obligations contracted down to team leaders

Source, propositions formulated by the author.

2.2. Case building and zoning

Tower C1 is a social housing building in Hung Loc urban area, Nghe An Province. Floors 4 to 20 share one plan with two blocks, each with its own core and 18 apartments per floor, of which 16 are two bedroom units of 66.6 to 69.9 m^2, one is a one bedroom unit and one is a studio. The typical floors contain 612 apartments with about 39,841 m^2 of net area. Each floor was divided into six zones of six apartments (Figure 1). Net areas are 382.9 m^2 in Z1 and Z6, 412.8 m^2 in Z2 and Z5, and 376.1 m^2 in Z3 and Z4, a spread of 9.8%. Net area was used as a proxy for work content for every wagon. This is a simplification. Every zone contains six kitchens and at least six bathrooms, so the wet room wagons W6, W8 and W13 vary less between zones than net area suggests, while Z1 and Z6 each contain a one bedroom unit and Z3 and Z4 each contain a studio and a two bedroom plus one unit (Figure 1), so the proxy understates these four zones for the same wagons. Crew sizes should therefore be calibrated per wagon on site.



Figure 1. Typical floor plan of Tower C1, floors 4 to 20, with six takt zones (2PN two bedroom, 1PN one bedroom, 2PN+1 two bedroom plus one)

Source, the author.

2.3. Takt plan

The train covers apartment fit out from partition masonry to handover inspection. Corridors, lobbies, shafts and the facade are excluded and would form separate trains. Table 2 lists 16 wagons. Labour content for the largest zones scales with net area elsewhere, giving about 55,980 worker days for the 102 takt areas, of which about 770 worker days belong to the two hold point wagons W3 and W16. These values are site productivity assumptions of the author. They were not derived from the estimating norms of Circular No. 38/2026/TT-BXD [23], which serve cost estimation rather than production planning, and they should be calibrated on site. All plans share the same labour for the working wagons, so peak workforce at equal completion can be compared between plans, but absolute durations and the takt time depend directly on this assumption. The takt plan and the conventional plans were computed in a purpose written script of the author; the input tables and the daily outputs are available from the author on request.

Table 2. Assumed takt train and typical crews used in conventional plans

Wagon	Work content	Labour in largest zone (worker days)	Takt crew	Typical crew per block
W1	Partition masonry	48	12	15
W2	MEP rough in, air conditioning pipework, pressure test	44	11	10
W3	Hold point, acceptance of concealed MEP	4	1	Waiting time
W4	Plastering of partitions	64	16	25 for W4 and W5
W5	Plastering of external wall faces and reveals	64	16	
W6	Waterproofing and ponding test	8	2	4
W7	Ceiling framing and ceiling MEP	20	5	4
W8	Screed and tiling in wet rooms and kitchen	60	15	12
W9	Gypsum ceiling boards where specified	16	4	4
W10	Floor tiling in dry rooms	72	18	15
W11	Skim coat and primer	72	18	15
W12	Doors	24	6	5
W13	MEP second fix and sanitary fittings	24	6	6
W14	Final paint coat	40	10	10
W15	Cleaning, testing and snagging	16	4	5
W16	Hold point, handover inspection	4	1	Waiting time
Total		580	145	130

Source, assumptions by the author.

Concealed services are accepted before plastering. Ceiling framing precedes wet room tiling, boards follow once tiles reach the ceiling, and boards are closed before dry room floor tiling. Skim coat starts 20 working days after plastering ends. With n wagons, m takt areas and takt time T, the production period D of one train is

$$D = (m + n - 1) \times T \quad (1)$$

and the crew c_k of wagon k is

$$c_k = \left\lceil \frac{L_k}{T} \right\rceil \quad (2)$$

where L_k is the labour of wagon k in the largest zone, in worker days, and $\lceil\ \rceil$ denotes rounding up to a whole worker. The crew of one wagon in a zone of six apartments was limited to 18 workers, about one worker per 23 m² of net area, and T was set as the smallest whole number of days, not less than four, that respects this limit. The floor of four days was chosen so that an acceptance of concealed works or a handover inspection, which takes three working days in Section 2.4, fits inside one takt with one day for handoff. With the assumed labour T is four days, all wagons use their full takt in Z2 and Z5, and other zones gain 7 to 9% spare capacity. The train climbs floor by floor, reversing direction on each floor (Figure 2). No capacity buffer was added beyond the rounding of crews, so that the comparison isolates the method; the consequence is examined in Section 3.3.

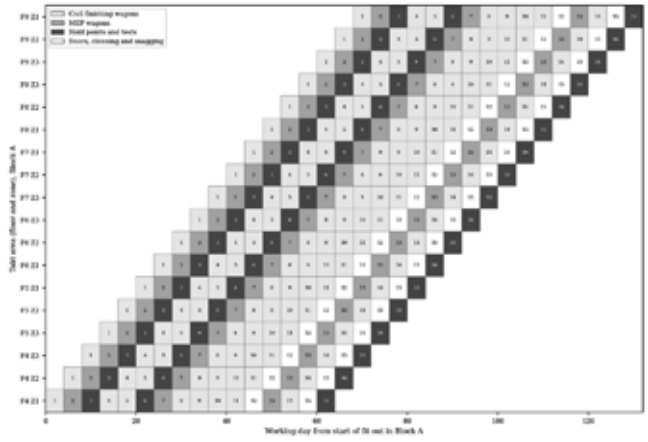


Figure 2. Takt chart for Block A, floors 4 to 9, with wagon numbers

Source, the author.

2.4. Conventional plans and indicators

The conventional plans are line of balance simulations constructed by the author, not the contractor's schedule. They use the packages of Table 2 with plastering merged and hold points as waiting times, so the labour they carry is about 55,210 worker days before crews are rounded up to whole workers, against 55,980 in the takt train, which includes the two hold point wagons. In each location unit a trade starts when its predecessor has completed 50% of its work there, and cannot finish before the predecessor's work is accepted plus three working days. Acceptance of concealed works and handover inspection each take three working days. Crews move on as soon as they finish and are counted only while working. FF e sequences floor by floor with typical crews scaled by a common factor to finish no later than the takt plan. FF b sequences floor by floor with crews sized in proportion to labour, as in takt, scaled in the same way. Crews were rounded up to whole workers, and the smallest scaling factor meeting the completion date was found by bisection. BP e uses batches of six, five and six floors per block with scaled typical crews.

All plans assume six working days per week, no holiday stop, two parallel blocks, and the contractor's frame cycle of two floors every 12 working days, with a floor available for fit out when the frame is three floors above it. Indicators were the production period, counted for every plan from the day the first floor is released by the frame to the last handover inspection; the peak daily workforce; the average daily workforce over the days on which fit out crews are on site; first handover, meaning the working day on which the first zone passes its handover inspection by the contractor and the supervision consultant, which is an internal milestone and not delivery to buyers; the handover pattern; average apartments open, meaning apartments started but not yet through their handover inspection, averaged over the production period; and crew days reserved or spent waiting. Sensitivity covered labour content, the overlap rule and batch size.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Takt plan

By Eq. (1) and Eq. (2), run as two trains, the takt plan S2 takes 264 working days with a peak of 290 workers and hands over six apartments per block every four days from day 64. A single train would take 468 days with 145 workers. Each train consumes one floor every 12 working days, while the frame releases a floor every six, so fit out never waits for the structure. Crews sized for the largest zones reserve about 59,160 crew days, 5.7% above the estimated labour of 55,980 worker days, and about 7% above the crew days of the balanced floor by floor plan in Section 3.2, which excludes the hold point wagons.

3.2. Comparison with conventional plans

Table 3 and Figure 3 show three effects.

Table 3. Takt plan compared with conventional plans finishing no later

Indicator	Takt S2	FF b	FF e	BP e
Production period (working days)	264	250	257	259
Peak workforce	290	312	332	488
Average workforce	224	224	221	254
First handover (working day)	64	73	69	199
Handover pattern	12 apartments every 4 days	36 apartments about every 11 days	36 apartments about every 12 days	216, 180 and 216 apartments
Average apartments open	148	188	239	379
Crew days worked or reserved	59,160	55,450	56,160	55,920
Crew days waiting if crews stay	0	2,670	6,090	12,300

Source, calculated by the author.

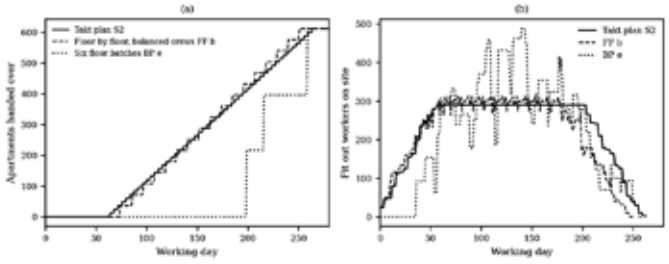


Figure 3. Cumulative apartments handed over (a) and daily workforce (b)

Source, calculated by the author.

The largest effect is batch size. Moving from six floor batches to floor by floor sequencing with the same crew ratios lowers the peak from 488 to 332 workers, brings the first handover forward from day 199 to day 69 and reduces open apartments from 379 to 239, because each trade in BP e lags half a batch of 90 to 108 apartments and each batch waits for six floors of structure. The second effect is crew balance. Balanced floor by floor crews lower the peak to 312 workers, open apartments to 188 and waiting crew days from 6,090 to 2,670. The typical crews of Table 2 are unbalanced because team leaders size them by their own capacity, as stated in P1. What remains for takt is small. It needs 22 fewer workers and keeps 40 fewer apartments open than FF b, but reserves about 3,700 more crew days, or about 1,000 more if FF b crews were kept on site while waiting. Part of this remaining difference is still a location size effect, because FF b uses the floor of 18 apartments as its location unit while takt uses zones of six, so it is an upper bound on what the method itself contributes.

3.3. Sensitivity

Table 4 tests labour content, including 1.5 and 2 times the assumption with the density limit applied, together with the overlap rule and batch size.

Table 4. Sensitivity of the takt plan and floor by floor plans with balanced crews

Case	Takt S2	FF b
Labour 90% and 110%, fixed crews, period (working days)	264 and 330	228 and 273
Labour 80% and 120%, fixed crews, period (working days)	264 and 330	206 and 298
Labour 150%, takt time, period, peak, first handover	6 days, 396, 290, 96	Same period, peak 248 to 322, first handover 65 to 140
Labour 200%, takt time, period, peak, first handover	8 days, 528, 290, 128	Same period, peak 238 to 320, first handover 72 to 187
Trade starts after predecessor finishes, peak, first handover, open apartments	290, 64, 148	264, 57, 141
Trade starts at 30%, peak, first handover, open apartments	290, 64, 148	268, 61, 148
Trade starts at 70%, peak, first handover, open apartments	290, 64, 148	322, 94, 218
Batches of 2, 3, 6 floors, first handover	64	131, 160, 204
Batches of 2, 3, 6 floors, open apartments	148	280, 342, 384

Source, calculated by the author.

Larger batches consistently delay handover and increase open apartments [6]. The batch rows of Table 4 use balanced crews, which is why the six floor case gives 204 and 384 rather than the 199 and 379 of BP e in Table 3, which uses typical crews. If real labour is 1.5 or 2 times the assumption, the density limit raises the takt time to six or eight days and the period to 396 or 528 working days, while balanced floor by floor plans finishing at the same time keep a peak range that still contains the 290 workers of takt. The overlap rule does not act monotonically. The peak of the balanced floor by floor plan is 264 workers when each trade waits for its predecessor to finish, 268 when it starts at 30% of the predecessor's work, 312 at 50% and 322 at 70%. The no overlap case and the 30% case match or beat takt on all three indicators, and only the 70% case is clearly worse. The partly overlapped cases are penalised by the rule of Section 2.4 that a trade cannot finish before the predecessor's work is accepted, which stretches trade durations and, once crews are scaled to hold the completion date, raises the peak; the no overlap case never meets that constraint. Takt is also fragile to underestimated labour. With every wagon at its full takt in Z2 and Z5, a 10% overrun raises the takt time to five days, while the floor by floor plan degrades gradually. Capacity buffers and early calibration therefore matter [10, 11]. This fragility is a property of the plan as configured here, with every wagon at its full takt in the largest zones and no capacity buffer, a choice made to isolate the method. A takt plan carrying a capacity buffer would give up part of its crew day figure in Table 3 in exchange for that robustness, which is the trade off simulated by Frandson [14].

3.4. Discussion

Regarding RQ1, most of the planning benefit in Table 3 comes from batch size and crew balance, which disciplined floor by floor sequencing can also deliver, and the small residual in Table 3 still contains a location size effect. This agrees with production theory [6] and with the finding that takt mainly improves location flow [7]. What takt adds is procedural. It forces every wagon to be balanced against a common takt, which the typical crew ratios omit, and fixes a four day cycle on six apartments that makes delay visible within days and gives inspections, deliveries and crew commitments a fixed date. Such effects, reported as improved schedule adherence in residential cases [8], cannot be proven by an ex ante plan.

Regarding Aims 2 and 3, a takt plan with every wagon at its full takt cannot absorb a short crew or a slow zone, so P1 to P3 describe exactly the risks that would push it from four to five days. For C1, labour only contracts would fix a minimum crew per wagon and recognise payment for zones that passed their hold point, within the contract freedom of Decree No. 210/2026/NĐ-CP [21]. Inspections for W3, W6 and W16 would have standing slots each takt, and team leaders would attend daily takt meetings. These are design implications derived from the plan and from Table 1, not tested results; P2 and P6 in particular restate the payment and commitment clauses of Keskiniva et al. [22] in the terms of labour only contracting.

The study has limits. It compares plans on paper, labour content and crews are estimates that may differ from estimating norms, the conventional plans represent planning logics rather than the C1 schedule, and the propositions rest on professional observation. The model also omits constraints that would bind on site, namely the external wall and window front that must precede W5, the completion of risers and of permanent power and water needed for W13 and W15, hoist capacity for a workforce of about 290, and the availability of the top floors, which the three floor rule delays for the last takt areas. The comparison is deterministic, so it cannot show the effect that takt has on variability and schedule adherence, which is where its reported benefits lie [8, 14]. Finally, first handover in this paper is an internal inspection milestone; delivery to buyers depends on completion and acceptance of the whole building, including fire safety acceptance.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Under the assumed labour and completion within 264 working days, six floor batches need a peak of 488 workers, floor by floor sequencing with typical crew ratios 332, and balanced floor by floor sequencing 264 to 322. Takt, with 290 workers, day 64 and 148 open apartments, falls within that range while reserving about 7% more crew days than the balanced floor by floor plan. Batch size and crew balance, not the takt method itself, drive the planning benefit, and part of the small residual is a location size effect.

The contribution of takt is to enforce balanced crews and a fixed rhythm for zone level control, crew commitments and scheduled inspections, at the price of fragility to underestimated labour. With up to twice the assumed labour, the takt time rises to eight days but the relative findings hold.

It is recommended that contractors of Vietnamese high rise housing first reduce batches to one floor or less and balance crews to labour, then adopt takt where they can secure minimum crews, zone based payment and scheduled inspections. Future research should measure takt performance on C1 against a balanced floor by

floor reference and test the six propositions with site managers and team leaders.

DECLARATIONS

The author holds a management position in the group that develops the Fhome+ Hung Loc project and had access to the drawings and the frame schedule of Tower C1 in that capacity. The author holds the rights to the floor plan reproduced in Figure 1. No funding was received for this study. The labour assumptions, crew tables and plan calculations are the author's own and are available from the author on request. The author declares no other conflict of interest.

REFERENCES

[1] L. Koskela. Application of the new production philosophy to construction. Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, Tech. Rep. 72, 1992. Internet: https://purl.stanford.edu/kh328xt3298 (accessed: 8/2026).

[2] S. Haghsheno, M. Binninger, J. Dlouhy and S. Sterlike. History and theoretical foundations of takt planning and takt control, in Proc. 24th Annu. Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC 24), Boston, MA, USA, 2016, pp. 53-62. Internet: https://www.iglc.net/Papers/Details/1297 (accessed: 8/2026).

[3] A. Frandson, K. Berghede and I. D. Tommelein. Takt time planning for construction of exterior cladding, in Proc. 21st Annu. Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC 21), Fortaleza, Brazil, 2013, pp. 527-536. Internet: https://www.iglc.net/Papers/Details/902 (accessed: 8/2026).

[4] A. G. Frandson, O. Seppänen and I. D. Tommelein. Comparison between location based management and takt time planning, in Proc. 23rd Annu. Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC 23), Perth, Australia, 2015, pp. 3-12. Internet: https://www.iglc.net/Papers/Details/1181(accessed: 7/2026).

[5] K. Keskiniva, A. Saari and J.-M. Junnonen. Indicators for takt production performance assessment-A conceptual study. Buildings, vol. 14, no. 1, Art. no. 50, 2024, doi: 10.3390/buildings14010050.

[6] W. J. Hopp and M. L. Spearman. Factory Physics, 3rd ed. Long Grove, IL, USA: Waveland Press, 2011.

[7] J. Lehtovaara, O. Seppänen, A. Peltokorpi, P. Kujansuu and M. Grönvall. How takt production contributes to construction production flow: A theoretical model. Construction Management and Economics, vol. 39, no. 1, pp. 73-95, 2021, doi: 10.1080/01446193.2020.1824295.

[8] W. Power, D. Sinnott and P. Lynch. Takt complementing Last Planner® System on residential construction projects. Construction Economics and Building, vol. 24, no. 4/5, pp. 58-80, 2024, doi: 10.5130/AJCEB.v24i4/5.8846.

[9] I. D. Tommelein, R. V. Coelho, C. T. Formoso, K. B. Barth and F. B. de Vargas. No single takt planning method fits all projects, in Proc. 32nd Annu. Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC 32), Auckland, New Zealand, 2024, pp. 202-213, doi: 10.24928/2024/0151.

[10] K. Keskiniva, A. Saari and J.-M. Junnonen. Takt planning in apartment building renovation projects. Buildings, vol. 10, no. 12, Art. no. 226, 2020, doi: 10.3390/buildings10120226.

[11] J. Dlouhy, M. Binninger and S. Haghsheno. Buffer management in takt planning - An overview of buffers in takt systems, in Proc. 27th Annu. Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC 27), Dublin, Ireland, 2019, pp. 429-440, doi: 10.24928/2019/0226.

[12] M. Kozlovská and D. Kempecova. Impact of takt-time planning on plastering work productivity: A case study. Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering, vol. 18, no. 1, 2023, doi: 10.2478/sspjce-2023-0002.

[13] F. Ding, M. Liu, S. M. Hsiang, P. Hu, Y. Zhang and K. Jiang. Duration and labor resource optimization for construction projects-A conditional-value-at-risk-based analysis. Buildings, vol. 14, no. 2, Art. no. 553, 2024, doi: 10.3390/buildings14020553.

[14] A. G. Frandson. Takt time planning as a work structuring method to improve construction work flow. Ph.D. dissertation, Univ. of California, Berkeley, CA, USA, 2019. Internet: https://escholarship.org/uc/item/6dp4n4fz (accessed: 7/2026).

[15] E. Asadian, R. Leicht and J. Messner. Lean adoption barriers for trade contractors. in Proc. Canadian Society for Civil Engineering Annu. Conf. Singapore: Springer, 2023, pp. 211-223. Internet: https://pure.psu.edu/en/publications/lean-adoption-barriers-for-trade-contractors/ (accessed: 7/2026).

[16] B. N. Nguyen. Evaluating outlook for lean construction in Vietnam through a study on perception of waste. Science and Technology Development Journal: Economics, Law and Management, vol. 5, no. 2, pp. 1407-1418, 2021, doi: 10.32508/stdjelm.v5i2.725.

[17] P. L. Le and N. T. D. Nguyen. Prospect of lean practices towards construction supply chain management trends. International Journal of Lean Six Sigma, vol. 13, no. 3, pp. 557-593, 2022, doi: 10.1108/IJLSS-06-2020-0071.

[18] P. V. H. Son and P. V. Tien. Apply EZStrobe to simulate the finishing work for reducing construction process waste. Scientific Reports, vol. 14, Art. no. 349, 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50442-4.

[19] National Assembly of Vietnam, Law on Construction No. 135/2025/QH15 of 10 December 2025, Hanoi, Vietnam, 2025. Internet: https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Xay-dung-Do-thi/Luat-Xay-dung-2025-so-135-2025-QH15-675213.aspx (accessed: 8/2026).

[20] Government of Vietnam. Decree No. 207/2026/NĐ-CP of 15 June 2026 detailing a number of articles of the Law on Construction on quality management, construction execution and maintenance of construction works, Hanoi, Vietnam, 2026. Internet: https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/nghi-dinh-so-207-2026-nd-cp-469769.htm (accessed: 8/2026).

[21] Government of Vietnam. Decree No. 210/2026/NĐ-CP of 15 June 2026 detailing the Law on Construction on construction contracts, Hanoi, Vietnam, 2026. Internet: https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/nghi-dinh-so-210-2026-nd-cp-469772.htm (accessed: 8/2026).

[22] K. Keskiniva, A. Saari and J.-M. Junnonen. Suggestions for takt production subcontract clauses - a conceptual study. Construction Innovation, vol. 23, no. 2, pp. 425-442, 2023, doi: 10.1108/CI-09-2021-0176.

[23] Ministry of Construction of Vietnam. Circular No. 38/2026/TT-BXD of 26 June 2026 promulgating construction norms, Hanoi, Vietnam, 2026. Internet: https://dutoan.gxd.vn/dinh-muc/thong-tu-38-2026-TT-BXD.html (accessed: 8/2026).

■Ngày nhận bài: 03/9/2026 ■Ngày sửa bài: 07/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2026

Two-Dimensional physical modelling of a reinforced soil retaining wall using Schneebeli analogue material

Mô hình vật lý hai chiều tường chắn đất có cốt sử dụng vật liệu tương tự Schneebeli

> NGUYEN SY HUNG[1,*]S, NGUYEN NHAT DUC ANH[1], NGUYEN TRONG NGHIA[2]
[1]Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Ho Chi Minh City
[2]Faculty of Engineering, Vietnamese-German University, Ho Chi Minh City
[*]Corresponding author: Email: sihung.nguyens@hcmute.edu.vn

ABSTRACT
The behaviour of a reinforced soil retaining wall under footing loading is governed by load transfer and displacement redistribution within the soil-reinforcement–facing system. This study employs a two-dimensional (2D), 1g physical model using Schneebeli analogue material to couple the load-settlement response with image-derived displacement fields on the observation plane. For the reference configuration, the load–settlement curve develops through several stages and exhibits distinct settlement increments as the system approaches complete failure, reflecting changes in the global response. A loading level of 22 kg is selected to represent an intermediate state before the major settlement increments, whereas 39 kg represents a near-collapse state immediately before the 40 kg loading level. At 39 kg, the marked grid exhibits pronounced distortion beneath and adjacent to the footing, extending towards the facing; the facing undergoes non-uniform displacement and several reinforcement strips bend downwards. Comparison of the total displacement field u between 22 and 39 kg shows that the high-displacement region expands and the transition zone becomes more pronounced, indicating increasingly concentrated displacement redistribution within the reinforced mass. Coupling the load-settlement response with spatial displacement information enables the mechanical evolution of the system to be tracked and provides a basis for parametric studies, soil-reinforcement interaction investigations, and numerical model validation. The results are interpreted at the mechanism scale of the 2D-1g model; extension to prototype structures requires an appropriate similitude framework and separate calibration.

Keywords: Reinforced soil retaining wall; 2D physical modelling; schneebeli analogue; image-based displacement measurement; progressive failure.

TÓM TẮT
Ứng xử của tường chắn có cốt dưới tác dụng của tải trọng móng được chi phối bởi quá trình truyền tải và sự tái phân bố chuyển vị trong hệ đất-cốt-mặt tường. Nghiên cứu này sử dụng mô hình vật lý hai chiều (2D) trong điều kiện trọng lực 1g với vật liệu tương tự Schneebeli, nhằm liên kết ứng xử tải-lún với trường chuyển vị xác định từ xử lý ảnh trên mặt quan sát của mô hình. Đối với cấu hình tham chiếu, đường cong tải-lún phát triển qua nhiều giai đoạn và xuất hiện các gia tăng độ lún rõ rệt khi hệ tiến gần đến trạng thái phá hoại hoàn toàn, phản ánh sự thay đổi trong đáp ứng tổng thể của hệ. Mức tải 22 kg được lựa chọn để đại diện cho trạng thái trung gian trước khi xuất hiện các gia tăng độ lún lớn, trong khi mức tải 39 kg đại diện cho trạng thái cận sụp đổ, ngay trước cấp tải 40 kg. Tại mức tải 39 kg, lưới đánh dấu cho thấy biến dạng rõ rệt ở khu vực phía dưới và lân cận móng, đồng thời vùng biến dạng phát triển theo hướng về phía mặt tường; mặt tường xuất hiện chuyển vị không đồng đều và một số dải cốt bị uốn xuống dưới. So sánh trường chuyển vị tổng u giữa hai mức tải 22 và 39 kg cho thấy vùng có chuyển vị lớn mở rộng và vùng chuyển tiếp trở nên rõ rệt hơn, biểu

thị sự tái phân bố chuyển vị ngày càng tập trung trong khối đất có cốt. Việc kết hợp ứng xử tải-lún với sự phân bố chuyển vị trong không gian cho phép theo dõi sự phát triển cơ học của hệ và tạo cơ sở cho các nghiên cứu tham số, nghiên cứu tương tác đất-cốt và kiểm chứng mô hình số. Các kết quả được diễn giải ở cấp độ cơ chế của mô hình 2D-1g; việc mở rộng kết quả sang công trình nguyên mẫu đòi hỏi một hệ thống tương tự phù hợp và quá trình hiệu chuẩn riêng.

Từ khóa: Tường chắn có cốt; mô hình vật lý 2D; vật liệu tương tự Schneebeli; đo chuyển vị bằng xử lý ảnh; phá hoại lũy tiến.

1. PROBLEM STATEMENT

A reinforced soil retaining wall is a soil-structure system in which the backfill, reinforcement elements and facing act together to transfer load, resulting in behaviour different from that of unreinforced soil [1, 2]. The system response depends on backfill properties, reinforcement stiffness and arrangement, soil–reinforcement interaction, connection details, and facing stiffness. Full-height rigid facings and their contribution to the overall behaviour of reinforced soil walls have been extensively documented by Tatsuoka et al. [3]. More specifically, field measurements reported by Yang et al. [4] showed non-uniform spatial distributions of earth pressure, reinforcement strain, and facing displacement in reinforced soil walls with rigid facings. When a localised surcharge such as a strip footing is applied behind the wall, the location and extent of loading also govern load transfer within the reinforced mass [5].

Two-dimensional physical modelling enables direct observation of granular motion under controlled boundary conditions. Schneebeli [6] proposed using cylindrical rods with axes normal to the observation plane to create a two-dimensional analogue granular medium. Calvetti et al. [7] showed that rod assemblies reproduce several important mechanical features of granular media and facilitate observation of particle motion, fabric rearrangement, and strain localisation. Sibille and Froiio [8] further developed photogrammetric measurements of kinematics and fabric in Schneebeli materials, while Kikumoto et al. [9] used a two-dimensional granular model combined with image processing for a reinforced soil retaining wall. In the present study, Schneebeli material is used as an analogue medium for mechanism-oriented 2D analysis; extension to prototype behaviour is treated as a separate similitude and calibration problem.

Previous studies of reinforced soil retaining walls have often focused on global response monitoring or numerical simulation. Yang et al. [4] measured earth pressure, reinforcement strain, and facing displacement; Yu et al. [10] numerically analysed an MSE wall reinforced with steel strips; and Morsy et al. [11] clarified the role of soil–reinforcement interaction in load transfer. For image-based measurement, White et al. [12] and Stanier et al. [13] demonstrated the ability of image techniques to determine displacement fields with high spatial density. For small-scale 2D models, the value of the experiment is enhanced when geometry, boundary conditions, analogue material, facing-reinforcement configuration, load path, load-settlement measurement, and image processing are described as an integrated framework.

Accordingly, this paper presents and evaluates a 2D-1g physical modelling platform for reinforced soil retaining walls using Schneebeli analogue material, a segmented facing formed by discrete steel blocks, and directly connected steel-strip reinforcement. The apparatus and measurement procedure are designed to record loading level, settlement, and images concurrently, thereby linking the load–settlement response to the displacement field at the same mechanical state. The study makes three main contributions: (i) establishment of a model system with well-defined boundary conditions for mechanism observation; (ii) integration of load-settlement measurements with image-based marked-grid displacement measurements; and (iii) use of a reference configuration to identify progressive displacement redistribution from an intermediate loading state to near collapse.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Two-Dimensional physical modelling apparatus and instrumentation

The apparatus comprises a 2D-1g physical modelling platform consisting of a steel reaction frame, an observation chamber with a transparent front face, a vertical loading system, two symmetrically positioned load cells, an LVDT and a front-facing camera. The steel reaction frame is sufficiently stiff that its deformation is negligible relative to that of the model, thereby limiting sudden release of elastic strain energy into the specimen. The usable chamber dimensions are $L_m \times H_m \times t_m$ = 1150 × 700 × 70 mm (Figure 1). The 60 mm-long Schneebeli rods are placed within the 70 mm-thick chamber, maintaining a near-2D geometry while providing clearance to control contact with the confining faces; residual boundary effects are considered when interpreting the results. Loading is applied incrementally using 2 kg masses placed on the loading beam. Each load cell has a 2 kN capacity and a nominal accuracy of 0.1%; the LVDT has a 100 mm range and a 0.01 mm resolution. A digital camera with a resolution greater than 5 megapixels is fixed approximately normal to the observation plane to acquire images for image-based marked-grid displacement measurement (Figure 2). Loading level, settlement, and images are synchronised using the same timestamp or acquisition index.

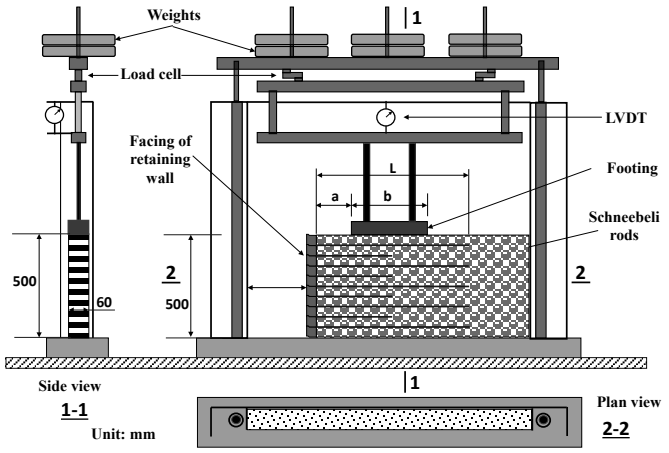


Figure 1. Schematic of the 2D reinforced soil retaining wall model, chamber geometry, loading path, and locations of the principal measurements

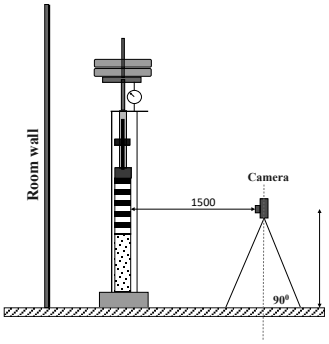


Figure 2. Camera arrangement for image-based marked-grid displacement measurement

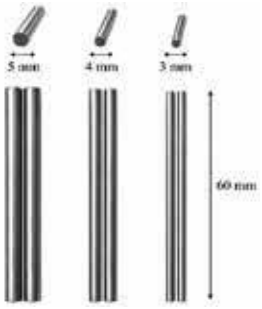


Figure 3. Schneebeli rods with diameters of 3, 4 and 5 mm and a length of 60 mm, used as the analogue granular material

2.2. Schneebeli analogue material

The analogue backfill comprises 60 mm-long stainless-steel rods with diameters of 3, 4 and 5 mm (Figure 3). The three size groups are mixed in approximately equal mass proportions and placed in the chamber using the same preparation procedure. The rod assembly forms a discrete granular medium that can be observed directly through the transparent front face. The unit weight of solid steel is taken as $\gamma_s = 78.5$ kN/m^3, while the equivalent unit weight of the prepared rod assembly is approximately $\gamma_{eq} = 64$ kN/m^3. Interaction between the rods is governed mainly by contact and friction; the material is therefore treated as a two-dimensional frictional granular analogue for observing kinematics, rearrangement, and strain localisation at the mechanism scale [7], [8].

2.3. Facing and reinforcement

The facing has a height H = 500 mm and consists of 10 discrete steel blocks stacked vertically. Each block has nominal dimensions of 50 × 30 × 60 mm (height × horizontal thickness × out-of-plane width) (Figure 4). The steel-block geometry represents a segmented facing; Figure 5 illustrates one type of concrete block used in Tensar reinforced soil wall systems. The discrete arrangement allows relative movement between facing blocks and changes in facing profile to be observed during loading. Reinforcement is represented by smooth steel strips 0.3 mm thick and 6 mm wide, with variable lengths, directly connected to the facing blocks. For this reinforcement type, interaction is interpreted primarily in terms of contact and friction along the steel strip, in contrast to the particle interlocking and passive resistance of transverse members commonly associated with geogrids.

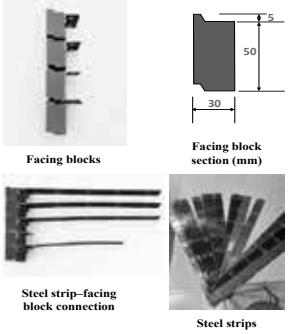


Figure 4. Steel facing block, steel-strip reinforcement, and reinforcement-facing connection details



Figure 5. Concrete facing block used in a Tensar reinforced soil retaining wall system. Source (Marine Wall System for New Quay Wall: Hartlepool Marina, Cleveland UK, 1990 - Tensar, case study: Ref 156)

2.4. Data-Processing variables for the reference configuration

For consistency with Figure 1, loading levels are reported as the total mass of the applied weights (kg); the two load cells are used to monitor the load path through the system. For image analysis, the intersections of the marked grid are tracked between the reference image and the image at the loading level of interest, and their coordinates are digitised to obtain the two in-plane displacement components u_x and u_y. This approach belongs to the family of image-based displacement measurements; PIV/DIC are cited as reference techniques for image-based full-field measurement [12, 13].

The quantity used in the displacement contour plots for the reference configuration is the total displacement magnitude u, calculated from the two displacement components:

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (1)$$

In this paper, u denotes total displacement magnitude and u_y denotes vertical displacement; contour lines of u or u_y therefore represent displacement fields. The quantities ε_x, ε_y, γ_{xy} and γ_{max} are strain measures derived from displacement gradients. Because spatial differentiation can amplify coordinate errors, the reference configuration focuses on u and u_y; strain measures are retained as an extension for image datasets with suitable spatial resolution and accuracy.

2.5. Reference configuration and experimental procedure

In the reference configuration, the H = 50 cm wall comprises 10 facing blocks. Five reinforcement strips have a length L = 45 cm and four strips have a length of 30 cm; the two lengths are arranged alternately at a vertical spacing of 5 cm. The steel footing has a width b = 35 cm and is positioned at a distance a = 30 cm from the wall edge (Figures 6 and 7). The footing is fabricated from a 50 × 50 × 5 mm hollow steel section, is much stiffer than the granular medium, and is treated as a rigid element within the model; its vertical displacement is monitored throughout the test. After placement of the material and footing, a 5 × 5 cm square grid is marked on the model surface.

Specimen construction follows the four main steps shown in Figure 6. First, the facing blocks are assembled and aligned vertically. The mixed Schneebeli material is then placed behind the wall and levelled using the same preparation procedure up to the elevation of each reinforcement layer. A reinforcement strip is subsequently fixed to the corresponding facing block and laid over the Schneebeli material. The material-placement and reinforcement-installation cycle is repeated until the wall reaches a height of 50 cm. Once the target geometry is achieved, the strip footing is positioned, the sensors are zeroed, and the reference image is acquired before loading.

Loading is increased in increments corresponding to 2 kg of applied mass. Each loading level is maintained for 3 min, and settlement is recorded at the end of the 3 min holding period. During loading, loading level, settlement, and images are synchronised using the same timestamp or acquisition index.

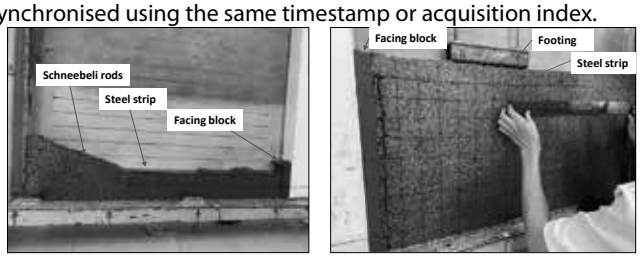


Figure 6. Construction of the retaining wall and footing

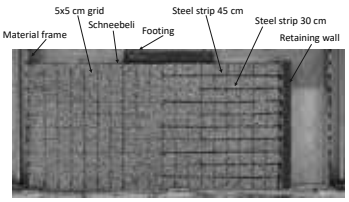


Figure 7. Reference test configuration; dashed lines trace the hand-marked grid on the Schneebeli material, while solid lines indicate the reinforcement strips

2.6. Image-Based Grid-Point displacement measurement and strain derivation from displacement gradients

Before loading, the 100 × 50 cm observation area is divided into a 50 × 50 mm square grid, and the grid intersections are used as tracking points. The pre-loading image is taken as the reference image, while images at the various loading states are treated as loaded-state images. The processing sequence is as follows: coordinate calibration using the 50 × 50 mm grid; digitisation of grid-point coordinates in Origin 2018; matching of corresponding points and calculation of u_x, u_Y, and u in Excel; and interpolation and contour construction in Surfer 10.

The reference image is imported into Origin 2018, and the coordinate axes are established with the Set Axis Value function using the 50 mm grid. This converts image coordinates to physical model coordinates. If Δp_x and Δp_Y are the mean pixel spacings between adjacent grid points in the horizontal and vertical directions, respectively, the corresponding conversion factors are determined from Equation (2).

$$k_x = \frac{50}{\Delta p_x} \; ; \; k_y = \frac{50}{\Delta p_y} \quad \text{(mm/pixel)} \tag{2}$$

Here, k_x and k_Y are the conversion factors in the horizontal and vertical directions, respectively. The Pick function in Origin is used to digitise the grid intersections, and the resulting X and Y coordinates are exported to Excel in physical length units. The calibration-digitisation-coordinate-export sequence is repeated for each loaded-state image. Fixed reference points on the apparatus frame are used to control rigid-body image shift. The principal sources of uncertainty are coordinate calibration, camera stability, lens/perspective distortion, digitisation accuracy, and consistency in matching the same grid point between images.

For a given grid point i, the coordinates in the pre-loading image are denoted (X_i^b, Y_i^b) and those in the loaded-state image (X_i^a, Y_i^a). Under the sign convention adopted in this study, the displacement components are determined from the coordinate differences according to Equation (3).

$$u_{x,i} = X_i^b - X_i^a \; ; \; u_{y,i} = Y_i^b - Y_i^a \tag{3}$$

Here, u_x and u_Y are the horizontal and vertical displacement components, respectively, according to the sign convention of the Origin coordinate system. The pre- and post-loading coordinate tables are matched in Excel using the same point identifiers to calculate u_x, u_Y and u. Depending on the required representation, u_Y is used for the vertical displacement field and u for the field of total displacement magnitude.

Grid-point coordinates together with u_Y or u are imported into Surfer 10 for interpolation and contour construction. For strain analysis, displacement gradients are approximated from the 50 mm grid points; for Δx = Δy = 50 mm and interior points, central differences may be used as given in Equations (4)–(6).

$$\varepsilon_x \approx \frac{[u_x(i+1,j) - u_x(i-1,j)]}{2\Delta x} \tag{4}$$

$$\varepsilon_y \approx \frac{[u_y(i,j+1) - u_y(i,j-1)]}{2\Delta y} \tag{5}$$

$$\gamma_{xy} \approx \frac{[u_x(i,j+1) - u_x(i,j-1)]}{2\Delta y} + \frac{[u_y(i+1,j) - u_y(i-1,j)]}{2\Delta x} \tag{6}$$

Here, ε_x and ε_Y are the normal strain components, and γ_{xY} is the engineering shear strain. From these components, the principal strains ε_1 and ε_2 and the maximum shear strain γmax are determined from Equations (7) and (8).

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{[\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}]^2 + (\frac{\gamma_{xy}}{2})^2} \tag{7}$$

$$\gamma\text{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + {\gamma_{xy}}^2} \tag{8}$$

Derivation of ε_x, ε_Y, γ_{xY} and γmax requires the coordinate-digitisation error to be small relative to the displacement variation between adjacent points because spatial differentiation can amplify errors [13]. Accordingly, the reference configuration uses u and u_Y as the principal quantities for describing full-field kinematics; strain fields are treated as an extension for image datasets with higher quality and point density.

At each load, the same calibration, point matching, and interpolation settings are applied to u and u_Y. When colour scales differ, comparisons rely on numerical values and contour lines.

The reliability of calibration, digitisation, and point matching can be assessed using two images of the model at the same mechanical state. For N grid points identified in images a and b, the background displacement error e_0 is evaluated as an RMS quantity using Equation (9).

$$e_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \Sigma_i [(X_i^b - X_i^a)^2 + (Y_i^b - Y_i^a)^2]} \tag{9}$$

The quantity e_0 combines the effects of image calibration/registration, grid-point identification, and residual image shift, and is proposed as a quality-control metric for subsequent test series.

When applied, e_0 should be compared with the characteristic displacement of the test. Only clearly identifiable and reliably matched points are used for interpolation; the analysis region, point numbering, sign convention, interpolation method and interpolation-grid size are kept consistent between loading levels.

3. RESULTS FOR THE REFERENCE CONFIGURATION

3.1. Load-Settlement response

The load-settlement response of the reference test is shown in Figure 8. Up to an applied mass of approximately 40 kg, settlement develops through several stages. Settlement increases relatively gradually at first, followed by distinct settlement increments over small changes in loading level, most notably around 29 - 30 kg and 36-37 kg. These increments are interpreted as markers of changes in the global response of the system. The image at 39 kg in Figure 9 concurrently shows pronounced grid distortion, non-uniform facing displacement, and relative movement within the granular mass, indicating that displacement redistribution is strongly developed at the higher loading stage. Associating each individual settlement increment with a specific local event would require a denser sequence of synchronised images across the loading history.

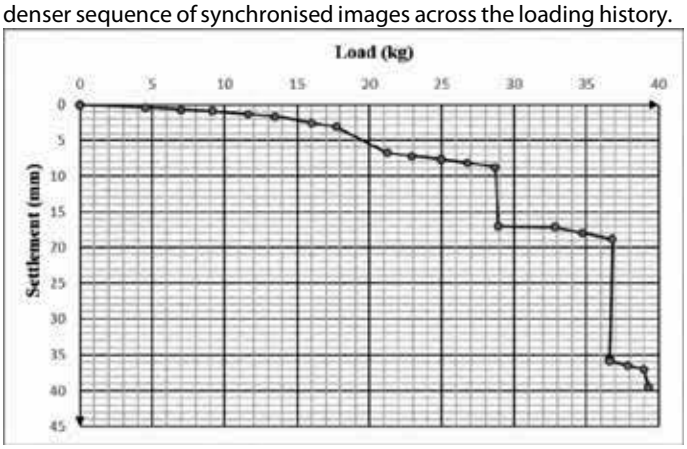


Figure 8. Load-settlement response of the reference test

At a loading level of 39 kg, Figure 9 shows that the footing has settled into the Schneebeli material and that the 5 × 5 cm grid is distorted non-uniformly across the observation plane. Geometric distortion is concentrated beneath the footing and extends towards the facing, whereas the region farther from the loading area on the left retains a grid geometry closer to the initial state. Facing displacement varies with elevation, remaining smaller near the toe and more pronounced around the mid-height region; several reinforcement strips within the deformed zone also curve downwards. These observations indicate simultaneous participation of the granular mass, reinforcement and facing in the load-transfer process. Figure 9 is used to identify the region of concentrated displacement at the geometric level; detailed shear deformation characteristics are reserved for strain-field analysis. At an applied mass of 40 kg, the test observation recorded complete wall collapse, with separation of facing blocks and reinforcement strips.

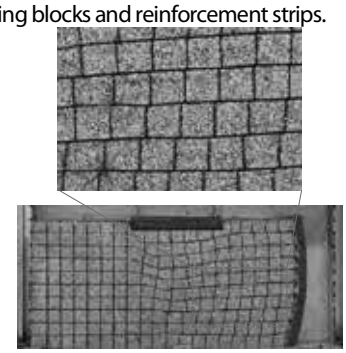


Figure 9. Geometric distortion of the square grid at a loading level of 39 kg. In the enlarged view above, solid lines indicate the reinforcement strips and dashed lines indicate the square grid marked on the Schneebeli model

3.2. Geometric deformation and image-derived displacement fields

Image-processing results at the representative loading levels of 22 and 39 kg are presented in Figures 10 and 11. The 22 kg state represents an intermediate condition before the major settlement increments in Figure 8, whereas 39 kg represents a near-collapse state immediately before the 40 kg loading level. At 22 kg, the total displacement magnitude u is already non-uniform across the observation plane (Figure 10). Higher values are concentrated mainly on the right-hand side of the model, particularly beneath and adjacent to the footing, while u is generally smaller towards the left. A transition zone with more closely spaced contour lines develops between these regions, extending from near the left edge of the footing downwards and towards the facing. The corresponding photograph shows only relatively modest grid distortion.

At 39 kg, the total displacement magnitude u increases markedly and the high-displacement region expands relative to the 22 kg state (Figure 11). High displacements are concentrated mainly on the right-hand side and in the upper-middle part of the granular mass, while lower values occur towards the left and in the lower region. The transition zone between the two regions exhibits a large displacement gradient and is spatially consistent with the area of pronounced grid distortion visible in Figures 11 and 9. Agreement between the photograph and the u field indicates increasing spatial differentiation of displacement with loading; mechanically, this evolution reflects increasingly concentrated displacement redistribution within the part of the reinforced mass affected by the footing load as the system approaches collapse.

Comparison of Figures 10 and 11 shows that, from 22 to 39 kg, the high-displacement region on the right expands in both magnitude and extent, while the lower-displacement region on the left remains distinct; at the same time, the transition between the two regions becomes steeper in terms of the contour spacing. Together with the geometric distortion shown in Figure 9, this trend indicates evolution from a relatively diffuse displacement field at the intermediate loading state to a more clearly partitioned field near collapse. In this study, this boundary is described as a displacement transition zone; characterisation of a slip surface is reserved for dedicated strain-field analysis.

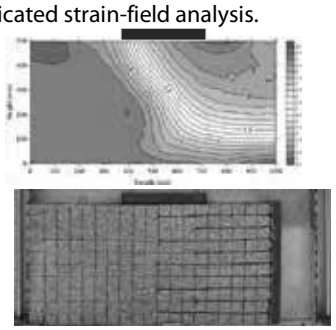


Figure 10. Total displacement magnitude u at a loading level of 22 kg (top) and photograph of the model at the same loading state (bottom).

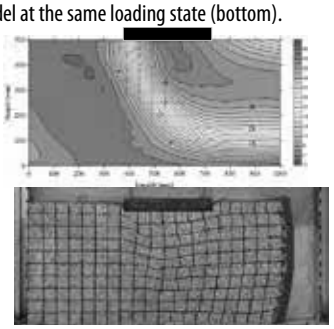


Figure 11. Total displacement magnitude u at a loading level of 39 kg (top) and photograph of the model at the same loading state (bottom)

4. DISCUSSION

The reference configuration reveals a consistent mechanical evolution between the global response and the spatial displacement field. The load-settlement response in Figure 8 changes from gradual settlement to distinct settlement increments, while Figures 9 - 11 concurrently show grid distortion, non-uniform facing displacement, curvature of several reinforcement strips, and expansion of the high-displacement region. The two datasets provide complementary information: the load-settlement curve identifies when the global system response changes, whereas the displacement field reveals where those changes develop within the reinforced mass. This evolution reflects increasingly concentrated load transfer from the footing into part of the reinforced mass and the simultaneous mobilisation of deformation in the granular material, reinforcement and facing. The settlement increments can therefore be interpreted as global-scale markers of displacement redistribution, while the photographs and contour plots provide spatial evidence of how that process evolves.

The observed evolution is consistent with the mechanical picture reported in previous studies while providing an additional direct spatial perspective. Yang et al. [4] reported non-uniform distributions of earth pressure, reinforcement strain, and facing displacement in reinforced soil walls with rigid facings, whereas Kikumoto et al. [9] demonstrated the value of combining load-displacement data with image processing in a two-dimensional granular model. The present study adopts marked-grid tracking through the Origin-Excel-Surfer workflow to associate each displacement field with a specific loading state. At the soil-reinforcement interaction level, Morsy et al. [11] emphasised load

transfer across the interface. In the smooth steel-strip-Schneebeli model, reinforcement curvature, facing displacement, and spatial partitioning of the u field indicate coupled response of the system components and provide a basis for separate interface characterisation through pullout testing and reinforcement-force measurements.

The 50 mm grid defines the spatial resolution of the displacement field, while image-to-coordinate calibration, camera stability, lens/perspective distortion, digitisation accuracy, point matching and interpolation govern the quality of the u field. The background displacement error e_0 is an appropriate metric for evaluating the complete processing chain in subsequent test series. Unlike point sensors, the displacement field reveals high-displacement regions and transition zones. A suitable strategy for this platform is to use u and u_γ to track full-field mechanical evolution and then supplement these quantities with strain measures for datasets of higher spatial resolution.

The mechanical scope of the model is defined by 1g conditions, two-dimensional idealisation, the geometry of the steel rods and the confining faces. The present results are interpreted at the kinematic and mechanism scale of the model; extension to prototype behaviour requires a dedicated similitude framework and separate calibration for stress level, geometry and three-dimensional effects. For the smooth steel strips, pullout/interface testing and direct measurement of reinforcement force provide a natural next step towards quantifying interface friction, pullout resistance and reinforcement-force mobilisation, thereby linking full-field observations to interface-level quantities. Repeated test series would additionally quantify scatter and statistical confidence in the observed characteristics.

Building on this platform, the apparatus has the potential to support a systematic research programme on reinforced soil retaining walls. First, repeated tests combined with e_0 assessment can quantify repeatability, experimental uncertainty and the sensitivity of indicators such as transition-zone position and the extent of the high-displacement region. Second, controlled variations in reinforcement length, arrangement and vertical spacing, footing width and position, and facing stiffness or segmentation can clarify load-transfer mechanisms and the evolution of displacement fields from low loading levels to near failure. Third, pullout testing, reinforcement-force measurements, and higher-resolution strain fields can relate full-field kinematics to mobilisation of the steel-strip–Schneebeli interface. Finally, load-settlement data, facing displacement, and displacement fields can be used concurrently to validate FEM, DEM, PLAXIS, or other numerical models, thereby establishing a controlled 2D benchmark database for mechanism studies and numerical comparison.

5. CONCLUSIONS

(1) The 2D-1g physical modelling platform combines load-settlement measurement with image observation, enabling the global response and displacement development over nearly the entire observation plane of the reinforced soil mass to be tracked concurrently. This integrated measurement capability is the core contribution of the experimental platform for mechanism-oriented research and provides a basis for cross-comparison among multiple response measures.

(2) For the reference configuration, the load-settlement response evolves from gradual settlement to distinct settlement increments around 29-30 kg and 36-37 kg. At 39 kg, pronounced grid distortion develops beneath and adjacent to the footing, the facing moves non-uniformly, and several reinforcement strips curve downwards. Together, these observations indicate increasingly concentrated displacement redistribution within the soil-reinforcement-facing system.

(3) The total displacement field u shows that, from the intermediate 22 kg state to the near-collapse 39 kg state, the high-displacement region expands and the transition zone becomes more pronounced, consistent with the area of concentrated geometric distortion in the photographs. This evolution provides a direct indicator of the load-dependent mechanical progression of the system.

(4) Image-based grid-point displacement measurement through the Origin 2018-Excel-Surfer 10 workflow adds spatial information to the load-settlement response using a transparent procedure that can be quality-controlled through calibration, point matching, and assessment of background displacement error. The results are interpreted at the mechanism scale of the 2D-1g model.

(5) The experimental platform has strong potential for systematic parametric studies of reinforcement length and arrangement, load position and width, facing configuration, repeatability and steel-strip-Schneebeli interaction, while also providing multi-field datasets for numerical model validation using load-settlement response, facing displacement and displacement fields.

REFERENCES

[1] H. Vidal. The principle of reinforced earth. Highway Research Record, no. 282, pp. 1-16, 1969.

[2] S. K. Shukla, N. Sivakugan and B. M. Das. Fundamental concepts of soil reinforcement-an overview. International Journal of Geotechnical Engineering, vol. 3, no. 3, pp. 329-342, 2009, doi: 10.3328/IJGE.2009.03.03.329-342.

[3] F. Tatsuoka, M. Tateyama, T. Uchimura and J. Koseki. Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures: 1996-1997 Mercer Lecture. Geosynthetics International, vol. 4, no. 2, pp. 81-136, 1997, doi: 10.1680/gein.4.0090.

[4] G. Yang, B. Zhang, P. Lv and Q. Zhou. Behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall with concrete-rigid facing. Geotextiles and Geomembranes, vol. 27, no. 5, pp. 350-356, 2009, doi: 10.1016/j.geotexmem.2009.03.001.

[5] S. H. Mirmoradi and M. Ehrlich. Experimental evaluation of the effects of surcharge width and location on geosynthetic-reinforced soil walls. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, vol. 19, no. 1, pp. 27-36, 2019, doi: 10.1680/jphmg.16.00074.

[6] G. Schneebeli. Une analogie mécanique pour les terres sans cohésion. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, vol. 243, no. 1, pp. 125-126, 1956.

[7] F. Calvetti, G. Combe and J. Lanier. Experimental micromechanical analysis of a 2D granular material: Relation between structure evolution and loading path. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, vol. 2, no. 2, pp. 121-163, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1099-1484(199704)2:2<121::AID-CFM27>3.0.CO;2-2.

[8] L. Sibille and F. Froiio. A numerical photogrammetry technique for measuring microscale kinematics and fabric in Schneebeli materials. Granular Matter, vol. 9, no. 3-4, pp. 183-193, 2007, doi: 10.1007/s10035-006-0032-0.

[9] M. Kikumoto, T. Nakai, S. M. Hossain, K. Ishii, A. Watanabe and F. Zhang. Mechanical behavior of geosynthetic-reinforced soil retaining wall, in Ground Improvement and Geosynthetics: Proceedings of Sessions of GeoShanghai 2010, Geotechnical Special Publication no. 207, ASCE, pp. 310-317, 2010, doi: 10.1061/41108(381)41.

[10] Y. Yu, R. J. Bathurst and Y. Miyata. Numerical analysis of a mechanically stabilized earth wall reinforced with steel strips. Soils and Foundations, vol. 55, no. 3, pp. 536-547, 2015, doi: 10.1016/j.sandf.2015.04.006.

[11] A. M. Morsy, J. G. Zornberg, D. Leshchinsky and J. Han. Soil-reinforcement interaction: Effect of reinforcement spacing and normal stress. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 145, no. 12, Art. no. 04019115, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002180.

[12] D. J. White, W. A. Take and M. D. Bolton. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Géotechnique, vol. 53, no. 7, pp. 619-631, 2003, doi: 10.1680/geot.2003.53.7.619.

[13] S. A. Stanier, J. Blaber, W. A. Take and D. J. White. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications.s Canadian Geotechnical Journal, vol. 53, no. 5, pp. 727-739, 2016, doi: 10.1139/cgj-2015-0253.

■Ngày nhận bài: 26/7/2026 ■Ngày sửa bài: 09/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 17/8/2026

Improving construction investment management for renewable energy facilities under Decree No. 272/2026/ND-CP: A case study of Ca Mau Province toward carbon emission reduction

Hoàn thiện công tác quản lý đầu tư xây dựng công trình năng lượng tái tạo theo Nghị định số 272/2026/NĐ-CP: Nghiên cứu trường hợp tỉnh Cà Mau hướng tới mục tiêu giảm phát thải carbon

> MAI HAI GIANG, LE TRUNG PHONG*, NGUYỄN TRỌNG TƯ, NGUYỄN VĂN NGHĨA
Thuyloi University
*Email: phonglt@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển dịch năng lượng và yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính đang đặt ra những yêu cầu mới đối với quản lý đầu tư xây dựng các công trình năng lượng tái tạo tại Việt Nam. Nghị quyết số 253/2025/QH15 và Nghị định số 272/2026/NĐ-CP bổ sung cơ chế đặc thù cho phát triển năng lượng quốc gia giai đoạn 2026 - 2030, trong đó có nhiều quy định liên quan trực tiếp đến quy hoạch điện lực, khảo sát điện gió ngoài khơi, năng lực tài chính của doanh nghiệp, xử lý hồ sơ và đầu tư lưới điện. Bài báo sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu có chọn lọc, phân tích pháp lý, nghiên cứu trường hợp và phân tích theo vòng đời dự án để đánh giá tác động của các quy định mới đến quản lý đầu tư xây dựng tại tỉnh Cà Mau. Trên cơ sở tiếp thu ý kiến phản biện, nghiên cứu phát triển khung quản lý tích hợp thành mô hình sàng lọc mức độ sẵn sàng của dự án, gồm sáu nhóm tiêu chí: tuân thủ pháp lý và quy hoạch; năng lực nhà đầu tư và tài chính; dữ liệu khảo sát và thiết kế; tổ chức thi công; đấu nối và giải tỏa công suất; quản lý phát thải carbon theo vòng đời. Mô hình được áp dụng thử nghiệm theo phương pháp nghiên cứu tại địa bàn đối với Dự án Nhà máy Điện gió Tân Thuận giai đoạn 3, sử dụng dữ liệu công khai. Kết quả cho thấy khung đề xuất có khả năng hỗ trợ cơ quan quản lý và chủ đầu tư nhận diện sớm các điểm nghẽn về dữ liệu, lưới điện và kiểm kê phát thải, qua đó nâng cao chất lượng chuẩn bị dự án, kiểm soát rủi ro và tăng tính minh bạch trong triển khai các công trình năng lượng tái tạo tại Cà Mau và các địa phương ven biển Việt Nam.

Từ khóa: Quản lý đầu tư xây dựng; năng lượng tái tạo; Nghị định số 272/2026/NĐ-CP; điện gió ngoài khơi; Cà Mau; phát thải carbon.

ABSTRACT

Energy transition and greenhouse-gas mitigation commitments are creating new requirements for the construction investment management of renewable energy facilities in Vietnam. Resolution No. 253/2025/QH15 and Decree No. 272/2026/ND-CP introduce special mechanisms for national energy development during 2026 - 2030, including provisions on power development planning, offshore wind surveys, enterprise financial capacity, dossier processing, and power-grid investment. This study applies a selective literature review, legal analysis, a case-study approach, and project life-cycle analysis to evaluate the implications of these new provisions for construction investment management in Ca Mau Province. In response to expert review comments, the study develops the integrated management framework into a project-readiness screening model with six criteria groups: legal and planning compliance; investor and financial capacity;

survey and design data; construction organization; grid connection and power-evacuation capacity; and life-cycle carbon management. The model is piloted through a desk-based assessment of the Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3 using publicly available data. The results indicate that the proposed framework can support regulators and project owners in identifying early bottlenecks related to data, grid infrastructure, and carbon accounting, thereby improving project preparation quality, risk control, and transparency in the implementation of renewable energy facilities in Ca Mau and other coastal provinces of Vietnam.

Keywords: Construction investment management; renewable energy; Decree No. 272/2026/ND-CP; offshore wind power; Ca Mau; carbon emissions.

1. PROBLEM STATEMENT

Renewable energy development is a central pillar of the global energy transition. Recent international energy outlooks show that solar photovoltaic and wind power remain the main drivers of renewable capacity growth, but their expansion also requires synchronized investments in power grids, storage, system flexibility, digital operation, and regulatory coordination [1, 2]. For countries with long coastlines and rapidly increasing electricity demand, offshore and nearshore wind power can provide an important source of low-carbon electricity; however, these projects also require more complex construction investment management than conventional industrial facilities.

In Vietnam, the commitment to achieve net-zero greenhouse-gas emissions by 2050 has created a strong policy impetus to accelerate the transition from fossil energy toward renewable and new energy sources. In the electricity sector, the 2024 Electricity Law, Decree No. 56/2025/ND-CP, and Decree No. 58/2025/ND-CP establish the baseline legal framework for power development planning, construction investment in electricity projects, competitive investor selection, and the development of renewable and new energy sources [3 - 5]. Resolution No. 253/2025/QH15 and Decree No. 272/2026/ND-CP subsequently introduced special mechanisms for 2026-2030, with emphasis on updating power plans, offshore wind surveys, enterprise financial capacity, dossier processing, inter-agency coordination, and approval of investors for power-grid projects [6, 7].

The revised National Power Development Plan VIII, approved under Decision No. 768/QD-TTg in 2025, continues to identify onshore, nearshore, and offshore wind power, solar power, liquefied natural gas power, and new-energy technologies as important elements of the national power mix [8]. This development direction has direct implications for construction investment management. Renewable energy projects must be assessed not only by installed capacity, but also by site and marine survey quality, foundation and cable-route design, port and logistics readiness, grid-connection capacity, environmental safeguards, operation and maintenance, and life-cycle carbon performance.

Ca Mau Province is an appropriate case study because it has extensive coastal space, favorable wind resources, and a strategic orientation toward renewable energy and marine economic development. Its provincial planning for 2021 - 2030, with a vision to 2050, was approved by the Prime Minister under Decision No. 1386/QD-TTg [9]. Public electricity-sector information also indicates that the province has a large portfolio of approved, operating, under-construction, and planned wind-power projects, while several operating wind projects have not been able to run at full capacity because the transmission system has not yet fully met grid-connection and power-evacuation requirements [10].

Existing studies on renewable energy in Vietnam have mainly addressed resource potential, electricity pricing, investment incentives, or generation planning. Research from a construction investment management perspective remains limited, particularly regarding how the new legal requirements of Decree No. 272/2026/ND-CP should be translated into project screening, life-cycle management, digital data governance, and carbon-emission management. This study therefore has four objectives: to clarify the implications of the emerging legal framework; to analyze the impacts of Decree No. 272/2026/ND-CP across the project life cycle; to develop an integrated project-readiness screening model; and to test this model using a desk-based pilot case in Ca Mau Province.

2. LITERATURE REVIEW AND LEGAL FRAMEWORK

2.1. Construction investment management in renewable energy projects

Renewable energy facilities differ from conventional building and industrial projects in several respects. They generally require substantial capital, depend strongly on natural-resource conditions, and need synchronized grid-connection and transmission systems. Project preparation is often lengthy, and implementation is subject to environmental, operational-safety, and electricity-market requirements. Offshore and nearshore wind projects add further complexity because of seabed geology, metocean conditions, marine logistics, port capacity, corrosion exposure, cable routes, and long-term maintenance requirements [11 - 14].

Risk-management studies of offshore wind power show that risks are distributed across the project life cycle rather than concentrated in a single phase. Chou et al. [12] analyzed construction and operation risks in offshore wind projects and emphasized the need for structured risk assessment during both construction and operation. Lin and Lu [14] examined component-handling operations in ports and showed that organizational interfaces, liveware, and operating procedures are critical to safety and efficiency. These findings are relevant to emerging offshore wind markets because delays, redesign, port bottlenecks, and interface failures may increase costs and reduce investor confidence.

From a construction-management perspective, a renewable energy project should therefore be managed as an integrated system. Survey data, design documents, cost estimates, schedules, grid-connection requirements, environmental safeguards, and operating data must be linked continuously. Fragmented administrative processing may be adequate for basic permitting, but it is not sufficient for complex renewable energy facilities that involve many actors, long implementation periods, and strong dependence on network infrastructure.

2.2. Life-cycle carbon management

Carbon assessment for renewable energy facilities should not be confined to the operational phase. Wind and solar facilities have low operational emissions, but emissions still arise from material production, equipment manufacturing, transport, construction, installation, component replacement, and end-of-life treatment. Life-cycle assessment studies of offshore wind projects have

demonstrated that foundation systems, turbine components, and supply-chain choices can materially affect environmental performance [13, 15]. ISO 14067:2018 provides a methodological basis for quantifying product carbon footprints and can be adapted to components, equipment, and construction work packages [16].

For construction investment management, a life-cycle carbon approach allows regulators and project owners to identify emission-reduction opportunities early. These opportunities include optimizing project location, reducing emission-intensive materials, selecting foundation and cable-route options with lower life-cycle impacts, improving logistics, managing construction waste, and extending service life. Carbon criteria can consequently be embedded in feasibility studies, design-option selection, bidding documents, consultancy contracts, operation and maintenance plans, and end-of-life requirements.

2.3. Digital data governance

Digital data governance is increasingly important for renewable energy construction because decisions depend on large volumes of multidisciplinary data, including geotechnical information, wind-resource measurements, metocean data, bathymetry, environmental baselines, cable routes, grid studies, land and marine-space boundaries, and equipment performance records. Information management standards such as ISO 19650-1:2018 and ISO 19650-2:2018 provide principles for organizing and digitizing information about buildings and civil engineering works, including building information modelling [17].

In the context of Ca Mau, a digital data-governance mechanism can support inter-agency coordination by linking planning information, survey datasets, investment-approval dossiers, environmental documents, construction status, grid-connection milestones, and operation data. Digital tools should not be treated as separate technology demonstrations. Their value lies in improving the traceability, consistency, and timeliness of data used for project screening and implementation control.

2.4. Emerging legal framework in Vietnam

Decree No. 56/2025/ND-CP details provisions of the Electricity Law concerning power development planning, electricity supply network plans, construction investment in electricity projects, and investor selection for electricity business projects [3]. Decree No. 58/2025/ND-CP specifies provisions on renewable and new energy electricity development [4]. Together with the Electricity Law, these instruments form the baseline legal framework for electricity projects.

Decree No. 272/2026/ND-CP was promulgated to detail and implement Resolution No. 253/2025/QH15. The Decree addresses updates to power development planning, eligibility conditions for offshore wind survey entities, eligibility conditions for enterprises preparing investment policy approval dossiers, receipt and processing of survey applications, inter-agency coordination, approval of investors for power-grid projects, and implementation measures [7]. The Decree is effective from 4 July 2026 through 31 December 2030 [7].

For construction investment management, the most important implication is that project preparation is no longer only a legal-dossier activity. It becomes a technical, financial, environmental, and data-driven screening process. For offshore wind surveys, Decree No. 272/2026/ND-CP requires survey entities to satisfy minimum owner-equity requirements, professional capacity conditions, and expenditure commitments [7]. For enterprises submitting investment policy approval dossiers for offshore wind projects selling electricity to the national power system, the Decree requires owner equity of at least 20% of total investment capital and a lending commitment for the remaining capital requirement [7].

2.5. Research gaps and novelty

The literature and legal review identifies four gaps. First, few studies have examined Decree No. 272/2026/ND-CP from a construction investment management perspective. Second, renewable-energy studies in Vietnam have not fully integrated legal compliance, survey data, design, construction, grid connection, operation, and carbon management within a unified project life-cycle framework. Third, carbon-emission management has not been translated into practical criteria for project screening and implementation control. Fourth, existing frameworks remain largely qualitative and have not been piloted using project-linked evidence from Ca Mau.

The novelty of this study lies in three aspects. First, it interprets a new energy-policy instrument through the lens of construction investment management. Second, it converts an integrated qualitative framework into a weighted project-readiness screening model that can support early-stage decision-making. Third, it applies the model to a Ca Mau wind-power case using publicly available data, thereby improving the practical verifiability of the proposed framework without creating unsupported project data.

3. RESEARCH METHODOLOGY

3.1. Research design

The study adopts a qualitative design supported by secondary-data analysis. Its focus is policy analysis and construction investment management rather than statistical hypothesis testing. Four methods are combined: a selective literature review, legal analysis, a case study of Ca Mau Province, and project life-cycle analysis. This design is suitable for evaluating a newly issued legal instrument and developing a management framework for practical application.

The revision also adds a desk-based pilot application to respond to the need for stronger practical verification. Because primary survey data and confidential project financial data were not available to the authors, the pilot application uses only public information. Accordingly, the scoring result is not presented as an official appraisal of a project; it is an illustration of how the proposed model can support project-readiness screening and reveal evidence gaps.

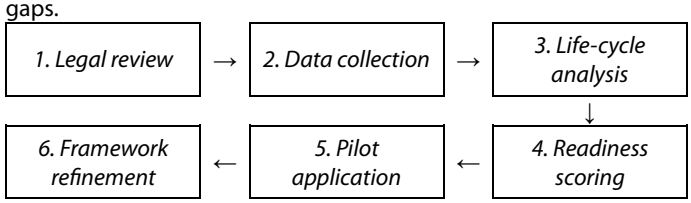


Figure 1. Research procedure

3.2. Data sources and reliability controls

Documents were selected according to three criteria. First, priority was given to official legal documents, provincial planning documents, public electricity-sector information, international organization reports, standards, and peer-reviewed studies. Second, materials published during 2018 - 2026 were prioritized to maintain currency; earlier sources were used only when they were legally valid or methodologically necessary. Third, all references were required to provide clear publication information, stable URLs, official issuing bodies, or digital object identifiers. Unverifiable materials and sources without identifiable issuing organizations were excluded.

Table 1. Data sources and reliability controls

Data category	Principal sources	Reliability controls and role in the study
Legal documents	Resolution No. 253/2025/QH15; Decree No. 272/2026/ND-CP; Decree No. 56/2025/ND-CP; Decree No. 58/2025/ND-CP; Electricity Law 2024	Use official legal portals or official government announcements; identify legal requirements affecting construction investment management.
Planning documents	Revised National Power Development Plan VIII; Ca Mau Provincial Planning for 2021-2030, vision to 2050	Use Prime Ministerial decisions and sectoral announcements; clarify source, grid, and provincial-development context.
Project-linked public information	EVN information on Ca Mau power evacuation; PECC2 information on Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3; provincial environmental-information portal	Use only published information; avoid unsupported assumptions about finance, internal schedules, or technical designs.
Scientific publications and standards	Peer-reviewed journal articles, ISO standards, and reports by the IEA, IRENA, and World Bank	Prioritize recent studies with DOI or institutional publication data; establish the basis for risk, life-cycle carbon, and data-governance analysis.

3.3. Analytical procedure

The analytical procedure comprised six steps: reviewing the legal foundations; compiling planning and project-linked public information; identifying life-cycle management implications; developing project-readiness criteria; applying the scoring model to a pilot case; and refining the integrated framework. The analysis considers six dimensions: legal and planning compliance, investor and financial capacity, survey and design data, construction control, grid connection and power evacuation, and life-cycle carbon and environmental management.

The framework is not intended to replace statutory appraisal procedures. Rather, it functions as a decision-support tool that can help regulators, project owners, and consultants screen project readiness before implementation, identify missing evidence, and prioritize actions that improve feasibility and investment efficiency.

3.4. Project-readiness scoring model

To strengthen the quantitative component of the study, the integrated framework is converted into a project-readiness scoring model. Each criterion is rated on a scale from 0 to 4, where 0 denotes no evidence, 1 denotes insufficient evidence, 2 denotes partial evidence, 3 denotes adequate evidence, and 4 denotes strong evidence. Weights are assigned according to their expected importance for renewable energy construction investment management in Ca Mau. The project-readiness score is calculated by Equation (1).

$$PRS = \Sigma(w_i \times \frac{s_i}{4}) \quad (1)$$

where PRS is the project-readiness score on a 0-100 scale, w_i is the weight of criterion i, s_i is the score of criterion i from 0 to 4, and $\Sigma w_i = 100$.

The proposed weights are intended for screening and can be recalibrated through expert consultation or empirical project data in future research. The model does not rank investors solely by numerical score. It combines scoring with evidence notes so that a high score is meaningful only when supported by verifiable documentation.

Table 2. Project-readiness criteria and measurable indicators

Criterion group	Weight	Indicative indicators for screening
Legal and planning compliance	20	Consistency with approved power planning; investment policy approval status; land and marine-space compatibility; environmental documentation; absence of overlapping survey areas.
Investor and financial capacity	15	Owner-equity ratio; lending commitment; audited financial statements; experience with comparable energy projects; capacity to finance survey and project-preparation costs.
Survey and design data readiness	20	Wind-resource data; geotechnical and metocean data; bathymetry; cable-route and grid-connection studies; port and logistics assumptions; data handover requirements.
Construction, logistics, and safety readiness	15	Construction method statement; EPC or contractor capacity; port, transport, and installation plan; schedule baseline; quality, safety, and interface-control mechanisms.
Grid connection and power evacuation	20	Connection scheme; substation and line readiness; transmission capacity; commissioning sequence; curtailment risk; coordination with grid owner and dispatch requirements.
Life-cycle carbon and environmental management	10	Emission inventory coverage; low-carbon design options; fuel and transport monitoring; waste and end-of-life plan; ecosystem impact mitigation and operation data.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Management implications of Decree No. 272/2026/ND-CP

Analysis of the official provisions indicates that Decree No. 272/2026/ND-CP affects the construction investment management chain for renewable energy projects rather than only electricity-sector administration. The new provisions require closer integration between planning, survey capability, project dossiers, financial capacity, coordination between competent agencies, and power-grid investment.

A key change concerns offshore wind surveys. Survey entities must have minimum owner equity corresponding to the proposed survey capacity and must satisfy professional and technical conditions [7]. The requirement reduces the likelihood that survey areas are occupied by entities without sufficient capability to produce reliable data. Another key provision concerns enterprises preparing investment policy approval dossiers for offshore wind projects selling electricity to the national power system. The owner-equity threshold of at least 20% of total investment capital and the requirement for a lending commitment strengthen financial screening [7].

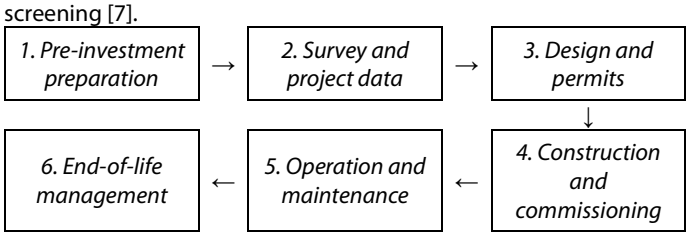


Figure 2. Life-cycle impact chain for renewable-energy construction management

Table 3. Project life-cycle implications of Decree No. 272/2026/ND-CP

Project phase	Key management issue	Expected management effect
Pre-investment preparation	Investor capacity, investment policy dossier, planning consistency, and responsibility allocation	Reduce financially unviable proposals and improve the quality of project preparation.
Survey	Survey capability, scope, marine data, geotechnical information, and data handover	Improve the reliability of design, cost estimation, and environmental assessment.
Design and permitting	Use of survey data in foundation design, cable routes, port logistics, environmental control, and grid connection	Reduce redesign, technical variation, and approval delays caused by incomplete input data.
Construction	Schedule, safety, logistics, quality control, interface management, and contract responsibilities	Improve control of cost, schedule, safety, and construction-interface risks.
Operation and maintenance	Asset performance, maintenance data, grid availability, and curtailment control	Improve utilization, reduce output losses, and support life-cycle performance management.
End-of-life management	Dismantling, recycling, blade treatment, cable recovery, and environmental restoration	Enable early consideration of long-term liabilities and circular-economy requirements.

4.2. Implementation context in Ca Mau Province

Ca Mau has clear advantages in coastal space and renewable energy development. Public electricity-sector information indicates that, by 2030, the province is expected to put into operation an additional 2,309 MW of wind power, 100 MW of utility-scale solar power, and 117 MW of rooftop solar power. It is also preparing for potential offshore wind-power export of 12,000-15,000 MW, subject to technical and legal conditions [10].

The same source reports that Ca Mau had 26 wind-power projects approved for investment, with a total capacity of 1,612.2 MW; 14 projects with 694.2 MW had entered commercial operation, while other projects were under construction, under investment procedures, or at the invitation-document stage [10]. These figures show that renewable energy is no longer a conceptual opportunity for Ca Mau. It is an expanding construction investment portfolio that requires portfolio-level coordination.

The most significant implementation issue is the synchronization between generation projects and the transmission grid. Public information states that some operating wind-power projects in Ca Mau have not operated at full capacity, especially during windy months, because the transmission system has not yet provided adequate grid-connection capability [10]. This is not only an operational issue; it is a construction investment management problem because the value of completed generation assets depends on transmission lines, substations, right-of-way management, commissioning sequences, and dispatch arrangements.

4.3. Desk-based pilot application: Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3

To respond to the review recommendation that the framework be tested on a concrete case, this section applies the project-readiness scoring model to Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3 in Ca Mau. The pilot uses public information only. PECC2 reported that the project was broken ground in October 2025 at Luu Hoa Thanh Hamlet, Tan Thuan Commune, Ca Mau Province. The project has a total capacity of 25 MW, comprising four offshore wind turbines of 6.25 MW each, pile foundations, 22 kV submarine cables, 22 kV overhead lines connecting to the 22/110 kV Tan Thuan substation, and synchronous systems including supervisory control, protection, metering, and auxiliary power [18].

The project is expected to be completed and put into operation in the fourth quarter of 2026, with an estimated annual output of about 61.5 million kWh [18]. PECC2 also reported that it was selected as the EPC contractor for design, procurement, and construction, and that it had previously performed the EPC role for Tan Thuan Wind Power Plant phases 1 and 2, which entered commercial operation in October 2021 [18]. The Ca Mau provincial portal reported approval of the environmental-impact-assessment appraisal result for Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3 in October 2025 [19].

Because public information does not disclose all financial, survey, metocean, detailed design, contract, and carbon-inventory data, the pilot score should be interpreted as an evidence-based screening result rather than an official appraisal. This approach is nevertheless useful because it shows where a regulator or project owner should request supplementary documentation before implementation or before replication across the provincial portfolio.

Table 4. Desk-based pilot scoring for Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3

Criterion group	Public evidence used for screening	Score	Management implication
Legal and planning compliance	Groundbreaking information, environmental-impact-assessment approval information, and project location in Ca Mau are publicly available [18], [19].	3.5/4	Readiness appears relatively strong, but complete planning and marine-space evidence should be reviewed in the official dossier.
Investor and financial capacity	Public information identifies the project owner and EPC contractor; audited finance and lending commitments are not publicly disclosed [18].	3.0/4	Financial evidence should be verified through audited statements and credit commitments rather than inferred from public announcements.
Survey and design data readiness	Turbine capacity, foundations, cables, substation connection, protection, metering, and auxiliary systems are described [18].	3.5/4	Technical scope is clear at overview level; detailed wind, geotechnical, metocean, and cable-route data should be archived in a common data environment.
Construction, logistics, and safety readiness	PECC2 is reported as EPC contractor and previously implemented phases 1 and 2 [18].	3.5/4	Implementation capacity is supported by prior experience; interface, safety, and logistics plans should remain monitored during construction.
Grid connection and power evacuation	Project-level connection to the 22/110 kV Tan Thuan substation is described; province-level public information shows transmission constraints for wind projects [10, 18].	3.0/4	Grid readiness should be tracked as a critical criterion because province-level curtailment risk may affect investment efficiency.
Life-cycle carbon and environmental management	Annual electricity output and environmental approval are public; quantified embodied-carbon, logistics-emission, and end-of-life data are not public [18], [19].	2.5/4	A life-cycle carbon inventory should be added to design, procurement, construction, operation, and end-of-life documentation.

Using Equation (1), the desk-based project-readiness score is approximately 80.6/100. The score suggests that the pilot case has a relatively high level of readiness when assessed from public evidence, particularly in technical scope and EPC capability. However, the lower score for life-cycle carbon management and the medium score for grid connection indicate two areas where project dossiers should be strengthened. The practical contribution of the model is therefore not only the final score, but also the evidence trail that identifies which documents and data should be requested before full implementation.

4.4. Performance indicators for applying the framework

The framework can be converted into a practical dashboard for provincial management. Indicators should be simple enough for administrative use, but sufficiently technical to reveal project-readiness weaknesses. The key indicators include: percentage of required legal and planning documents completed; availability of wind, geotechnical, metocean, environmental, and grid datasets; confirmed owner equity and lending commitments; completion status of substations and transmission lines; expected and actual curtailment rate; cost and schedule variance; environmental-compliance status; and coverage of life-cycle carbon data.

Digital data governance		
Legal and planning compliance	*Project readiness and investment efficiency*	*Investor and financial capacity*
Survey, design and construction control	*Life-cycle carbon and environmental data*	*Grid connection and power evacuation*
Dashboard outputs: readiness score; evidence gaps; action priorities; life-cycle monitoring		

Figure 3. Proposed integrated management framework and dashboard logic

These indicators should be applied at both project level and portfolio level. At project level, they help identify missing evidence before investment approval, construction commencement, or commissioning. At portfolio level, they help Ca Mau prioritize transmission and grid-connection projects that directly improve renewable power evacuation. This is consistent with the finding that renewable-energy output in Ca Mau depends on coordinated investment in generation, substations, and lines rather than on generation capacity alone [10].

4.5. Integrating carbon-emission management into construction investment procedures

Life-cycle carbon management should be embedded in existing construction investment procedures rather than added as a separate administrative layer. During pre-investment preparation, project alternatives should be compared not only by capacity and cost, but also by grid-connection feasibility, ecosystem sensitivity, and expected life-cycle emissions. During design, emission-intensive materials and components should be quantified and alternative foundation, tower, cable-route, and auxiliary-system options should be compared where data are available. During construction, fuel use, logistics, waste, and equipment mobilization should be monitored. During operation and maintenance, maintenance strategies, component replacement, performance data, and transmission losses should be linked with environmental reporting.

For Ca Mau, this approach is important because renewable-energy development is closely connected with coastal ecosystems, marine economic space, and transmission infrastructure. A project that produces low-carbon electricity may still create avoidable life-cycle emissions if material quantities, logistics, construction methods, replacement strategies, or end-of-life treatment are not managed. Conversely, a well-prepared project with transparent carbon and environmental data can strengthen the credibility of green growth and facilitate future access to sustainable finance.

5. PROPOSED IMPLEMENTATION ROADMAP

The proposed framework should be implemented in phases to avoid unnecessary administrative burden. Phase 1 should focus on standardization. Provincial authorities and relevant agencies can develop a minimum data requirement list for renewable energy projects, including legal status, planning consistency, survey scope, environmental documents, grid connection, construction milestones, and carbon-data coverage. The objective of this phase is to improve dossier quality and avoid repeated requests for supplementary information.

Phase 2 should focus on pilot application. Selected wind-power projects, substations, or transmission lines with strategic power-evacuation roles should be assessed using the project-readiness scoring model. The scoring should be performed by a multidisciplinary group involving construction management, electricity planning, environmental management, and grid-operation expertise. The result should be used to refine weights, indicators, and documentary requirements.

Phase 3 should focus on portfolio integration. The refined framework should be incorporated into internal guidance for renewable energy construction investment management in Ca Mau. Project-level scores can be aggregated to identify bottlenecks across the provincial portfolio, especially transmission constraints, missing survey data, delayed environmental documentation, and weak carbon-data coverage. Periodic updates should be made when legal regulations, power planning, or project status changes.

The roadmap should follow the principle of improving evidence quality rather than multiplying procedures. Data and emission criteria should support decision-making, shorten review time, improve transparency, and reduce investor risk. In particular, power-grid and transmission projects must be treated as integral components of the renewable energy ecosystem because power-evacuation capacity determines the effective utilization of generation assets.

6. CONCLUSIONS

This study examined the implications of Decree No. 272/2026/ND-CP for the construction investment management of renewable energy facilities. The results show that the Decree introduces requirements with direct effects on offshore wind surveys, financial capacity of participating entities, dossier processing, inter-agency coordination, and approval of investors for power-grid projects. These requirements should be interpreted as part of a project life-cycle management system rather than as isolated administrative steps.

For Ca Mau Province, renewable energy potential must be managed in coordination with transmission infrastructure, survey data, marine environmental conditions, investor capability, and carbon-emission objectives. Public information shows that Ca Mau has a large wind-power portfolio and that some operating wind projects have not operated at full capacity because of grid-connection and power-evacuation limitations [10]. This finding confirms that construction investment management must connect generation projects with substations, transmission lines, data governance, and operation planning.

The proposed framework comprises six operational criteria: legal and planning compliance; investor and financial capacity; survey and design data; construction, logistics, and safety readiness; grid connection and power evacuation; and life-cycle carbon and environmental management. The desk-based pilot application to Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3 demonstrates that the framework can be converted into a practical scoring model and can identify evidence gaps related to financial documents, detailed survey data, grid readiness, and life-cycle carbon inventories.

The study is limited by its reliance on public secondary data. The pilot score is therefore not an official appraisal and should not replace statutory review. Future research should include expert surveys, interviews with project owners and grid operators, quantitative carbon-emission assessment for different project types, and empirical validation using detailed project data. Nevertheless, the revised framework provides a more practical and verifiable basis for improving construction investment management of renewable energy facilities in Ca Mau and other coastal provinces of Vietnam.

REFERENCES

[1] International Energy Agency. Renewables 2025: Analysis and forecasts to 2030. IEA, Paris, 2025. Internet: https://www.iea.org/reports/renewables-2025 (accessed: 8/2026).

[2] International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway. IRENA, Abu Dhabi, 2024. Internet: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (accessed: 8/2026).

[3] Government of Vietnam. Decree No. 56/2025/ND-CP detailing provisions of the Electricity Law on power development planning, electricity supply network plans, construction investment in electricity projects, and investor selection for electricity business projects, 2025. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?docid=213010&pageid=27160 (accessed: 8/2026).

[4] Government of Vietnam. Decree No. 58/2025/ND-CP detailing provisions of the Electricity Law on renewable and new energy electricity development, 2025. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?docid=213011&pageid=27160 (accessed: 8/2026).

[5] National Assembly of Vietnam. Electricity Law No. 61/2024/QH15, 2024. Internet: https://vbpl.vn/TW/Pages/vbpq-toanvan.aspx?ItemID=172884 (accessed: 8/2026).

[6] National Assembly of Vietnam. Resolution No. 253/2025/QH15 on mechanisms and policies for national energy development during 2026-2030, 2025. Internet: https://vbpl.vn/TW/Pages/vbpq-toanvan.aspx?ItemID=186009 (accessed: 8/2026).

[7] Government of Vietnam. Decree No. 272/2026/ND-CP detailing provisions and implementation measures for Resolution No. 253/2025/QH15, 2026. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?docid=218787&orggroupid=2&pageid=27160 (accessed: 8/2026).

[8] Prime Minister of Vietnam. Decision No. 768/QD-TTg dated 15 April 2025 approving the revised National Power Development Plan for 2021-2030, with a vision to 2050, 2025. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?docid=213388&pageid=27160 (accessed: 8/2026).

[9] Prime Minister of Vietnam. Decision No. 1386/QD-TTg approving the Ca Mau Provincial Planning for 2021-2030, with a vision to 2050, 2023. Internet: https://chinhphu.vn/?docid=208979&pageid=27160 (accessed: 8/2026).

[10] Vietnam Electricity. Ca Mau determines to unblock electricity flow. EVN, 2025. Internet: https://en.evn.com.vn/d/en-US/news/Ca-Mau-determines-to-unblock-electricity-flow-60-206-501111 (accessed: 8/2026).

[11] World Bank. Offshore Wind Roadmap for Vietnam. World Bank, Washington, DC, 2021. Internet: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/ed9a1d00-c1ef-53e1-893d-ae87f7a78b85 (accessed: 8/2026).

[12] J. S. Chou, P. C. Liao and C. D. Yeh. Risk analysis and management of construction and operations in offshore wind power project. Sustainability, vol. 13, no. 13, article 7473, 2021, doi: 10.3390/su13137473.

[13] S. Moussavi, P. Barutha and B. Dvorak. Environmental life cycle assessment of a novel offshore wind energy design project: A United States based case study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 185, article 113643, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113643.

[14] M. S. M. Lin and B. S. Lu. Risk assessment and management in the offshore wind power industry: A focus on component handling operations in ports. Safety Science, vol. 167, article 106286, 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106286.

[15] Y. Cao, Y. Meng, Z. Zhang, Q. Yang, Y. Li, C. Liu and S. Ba. Life cycle environmental analysis of offshore wind power: A case study of the large-scale offshore wind farm in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 196, article 114351, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114351.

[16] International Organization for Standardization. ISO 14067:2018, Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification. ISO, Geneva, 2018.

[17] International Organization for Standardization. ISO 19650-1:2018 and ISO 19650-2:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling - Information management using building information modelling. ISO, Geneva, 2018.

[18] Power Engineering Consulting Joint Stock Company 2. Groundbreaking ceremony of Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3. PECC2, 2025. Internet: https://portal.pecc2.com/vn/le-dong-tho-du-an-nha-may-dien-gio-tan-thuan-giai-doan-3.html (accessed: 8/2026).

[19] Ca Mau Provincial Portal. Approval of the environmental-impact-assessment appraisal result for Tan Thuan Wind Power Plant - Phase 3, 2025. Internet: https://www.camau.gov.vn/danh-gia-tac-dong-moi-truong/phe-duyet-ket-qua-tham-dinh-bao-cao-danh-gia-tac-dong-moi-truong-du-an-nha-may-dien-gio-tan-thua-290017 (accessed: 8/2026).

TRƯỜNG CAO ĐẲNG GIAO THÔNG VẬN TẢI TRUNG ƯƠNG V

Địa chỉ: 28 Ngô Xuân Thu, phường Hải Vân, TP. Đà Nẵng



CHÚC MỪNG NGÀY
Nhà giáo
VIỆT NAM
20/11



ThS.KS NGUYỄN LÂM
Giám đốc Lâm Thịnh Phát

XÂY NHÀ TRỌN GÓI

UY TÍN • MINH BẠCH • ĐÚNG TIẾN ĐỘ

Thiết kế • Thi công trọn gói • Xin phép – Hoàn công • Sửa chữa – Chống thấm

- Bảo hành kết cấu 10 năm
- Bảo hành chống thấm 10 năm
- Hoàn tiền nếu sai vật tư cam kết
- Báo giá trọn gói – không phát sinh ngoài hợp đồng
- Hợp đồng rõ ràng, xuất hóa đơn VAT đầy đủ
- Trọn gói hồ sơ xin phép – hoàn công

CÔNG TRÌNH TIÊU BIỂU


Khách sạn Cadao 7 tầng


Tòa nhà khung thép
Khách sạn Tô Châu


Biệt Thự QT House

CÔNG TY TNHH THIẾT KẾ & XÂY DỰNG LÂM THỊNH PHÁT
Số 7B11, KDC Phú An, P. Hưng Phú, TP. Cần Thơ
Hotline/Zalo: 0976 066 132 lamthinhphat.vn

QUÉT MÃ ZALO
Nhận MIỄN PHÍ
Cẩm nang thi công

XI MĂNG CẨM PHẢ

Dựng xây cuộc sống



CÔNG TY CỔ PHẦN XI MĂNG CẨM PHẢ

(+84-203) 3 721995
(+84-203) 3 721996

Km6, Quốc lộ 18A, P. Quang Hanh,
Tỉnh Quảng Ninh

CHI NHÁNH PHÍA NAM

(+84-254) 3899 630
KCN Mỹ Xuân A, P. Phú Mỹ,
Tp. Hồ Chí Minh

VĂN PHÒNG TP. HỒ CHÍ MINH

(+84-283) 9100 937
Lầu 6 số 47 Điện Biên Phủ,
P. Tân Định, Tp Hồ Chí Minh