10-2026 | ISSN 2734-9888 | tapchixaydung.vn

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA BỘ XÂY DỰNG

JOURNAL OF CONSTRUCTION

MASTERISE HOMES

KIẾN TẠO TRẢI NGHIỆM XỨNG TẦM

KHÁM PHÁ NGAY

(028) 39 159 159

MasteriseHomes.Official

NHÀ PHÁT TRIỂN
BẤT ĐỘNG SẢN HÀNG HIỆU
ĐẲNG CẤP QUỐC TẾ

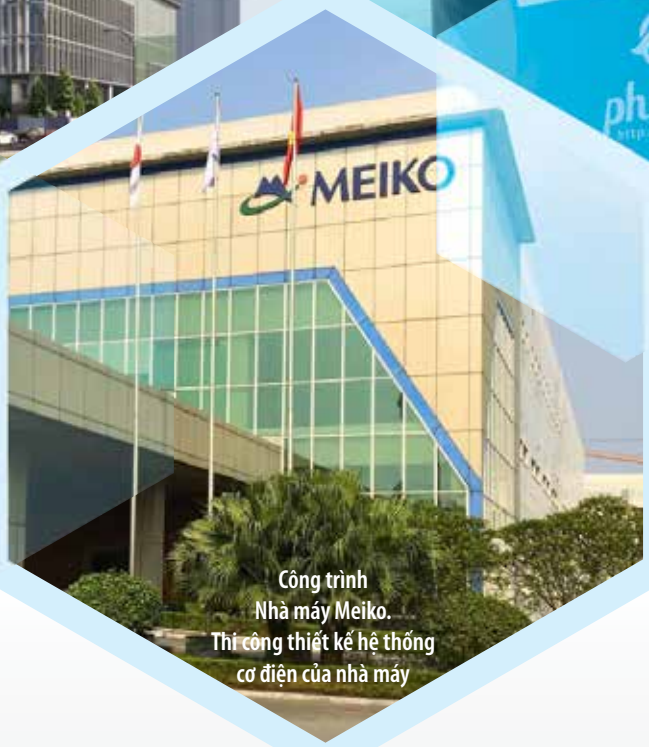
phuhai

http://phuhaico.vn

NGÀNH NGHỀ HOẠT ĐỘNG:
TỔNG THẦU CƠ ĐIỆN, CHUYÊN THIẾT KẾ
THI CÔNG HỆ THỐNG CƠ ĐIỆN CÔNG TRÌNH
VỚI CÁC HẠNG MỤC:
1. HỆ THỐNG ĐIỆN
2. HỆ THỐNG CƠ
3. HỆ THỐNG ĐIỀU HÒA THÔNG GIÓ
4. HỆ THỐNG PCCC
5. HỆ THỐNG CẤP THOÁT NƯỚC
6. HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA KHÁC.

Công trình
Cục An Ninh điều tra
A09 - Bộ Công An.
Thiết kế thi công
Hệ thống Điện,
Điều hòa thông gió,
Cấp thoát nước,
Xử lý khí thải

Công trình
Nhà máy Dongwha Thái Nguyên
Thiết kế thi công Hệ thống
cơ điện, PCCC



Công trình
Nhà máy Meiko.
Thi công thiết kế hệ thống
cơ điện của nhà máy

CÔNG TY CỔ PHẦN
ĐẦU TƯ XÂY LẮP VÀ THƯƠNG MẠI PHÚ HẢI

Khu đô thị mới - Phố đi bộ trung tâm thành phố Thái Nguyên (Central Square Thái Nguyên). Tổng thầu Cơ điện (MEP) & Phòng cháy chữa cháy (PCCC)

Công trình Trường liên cấp FPT Bắc Giang và FPT Vinh.
Tổng thầu MEP và PCCC

Tầng 4, Tòa nhà Xuân Mai Riverside, 206 Thanh Bình, Hà Đông, Hà Nội phuhaico.vn

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

CÔNG TY TNHH

TƯ VẤN THIẾT KẾ VÀ XÂY DỰNG DBE

MỤC LỤC CONTENT

10.2026 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: Hồ Gươm. Ảnh: Lê Việt Khánh

Giá 75.000 đồng

QUẢN LÝ NGÀNH
THANH NGA 8 Đầu tư đường sắt gắn với làm chủ công nghệ
THS DƯƠNG ĐÌNH TRUNG 10 Kiến trúc ITS thống nhất để kết nối dữ liệu toàn mạng lưới cao tốc
TỪ CHÍNH SÁCH ĐẾN CUỘC SỐNG
TS.KTS NGUYỄN TẤT THẮNG 14 Quản lý và chuyển đổi chức năng quỹ đất dư thừa sau mở đường tại Hà Nội: Kinh nghiệm quốc tế và đề xuất giải pháp tích hợp
GS.TS.KTS ĐỖ HẬU, TS.KTS NGÔ VIỆT HÙNG 18 Tháo gỡ "điểm nghẽn" trong cải tạo, tái thiết khu chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội
PGS.TS VŨ THỊ VINH 22 Đài phun nước thông minh trong kiến tạo bản sắc và phát triển không gian công cộng tại Thủ đô Hà Nội
TS NGUYỄN HUY HOẠCH 26 Thị trường các-bon Việt Nam: Gắn giảm phát thải với an ninh năng lượng và chuyển đổi xanh
KTS PHẠM THANH TÙNG 30 Hồ Gươm ...
TRÒ CHUYỆN VỚI CHUYÊN GIA
GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA 34 Bài toán về nước và câu chuyện vận hành đô thị
DIỄN ĐÀN KHOA HỌC
PGS.TS.KTS HOÀNG MẠNH NGUYÊN, NCV TRẦN PHƯƠNG ANH 40 Lựa chọn vật liệu nội thất theo cách tiếp cận vòng đời hướng tới phát thải thấp trong công trình xây dựng
GÓC NHÌN TỪ THỰC TIỄN
NGUYỄN HOÀNG LINH 46 TOD và tầm nhìn xa cho nhà ở xã hội
DOANH NGHIỆP 4.0
NGỌC HÀ 48 CONINCO: Tối ưu nội lực, vững bước vươn tầm
YÊN THƯ 50 Phúc Đạt Tân Uyên: Dấu ấn thi công nhà ở xã hội tại TP.HCM
PV 52 Sola - kiến tạo cuộc sống khỏe mạnh từ những điều gần gũi
AN TOÀN GIAO THÔNG
ĐẠI THẮNG 54 Quảng Ngãi phối hợp xóa lối đi tự mở, bảo đảm an toàn đường sắt
VĂN HÙNG 56 Dự án RECAF Khánh Hòa: Kết nối nguồn lực, phát triển bền vững
GIỚI THIỆU SÁCH MỚI
AN NHIÊN 57 Di sản kiến trúc Hải Phòng - từ dấu ấn Phố Cảng đến nguồn lực phát triển
NGHIÊN CỨU KHOA HỌC
THS.NCS HOÀNG BẢO TRÂM, THS HOÀNG HÀM MY 58 Phát triển bất động sản hỗn hợp tại khu vực TOD ở Hà Nội: Tiềm năng và một số vấn đề đặt ra
KTS CAO THÀNH NGHIỆP, GS.TS.KTS NGUYỄN QUỐC THÔNG, TS.KTS PHẠM NGỌC TUẤN 62 Sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP Hồ Chí Minh trong bối cảnh mới
ĐỖ MINH PHÚC 67 Khung tổ chức thực hiện quản trị rủi ro ngập úng trong phát triển đô thị thông minh tại Việt Nam
THS LÊ NGỌC HẢI, TS TRẦN XUÂN HIẾU, TS LÊ MINH KHUÊ, TS VƯƠNG XUÂN CẨN 72 Phương pháp tiếp cận từ dưới lên trong đồ án tái phát triển khu chung cư cũ ở Hà Nội
TS.KTS ĐỖ TRỌNG CHUNG 77 Thực trạng và thách thức của công nghệ mới trong thiết kế và xây dựng kiến trúc nhà ở nông thôn tại Việt Nam
THS.KTS TRẦN LÊ VĨNH TRÀ, TS.KTS NGÔ THỊ KIM DUNG 82 Biến đổi hệ giá trị kiến trúc chùa Khmer vùng Tây Nam Bộ trong bối cảnh đương đại và định hướng bảo tồn
TS DƯƠNG THỊ THANH XUYẾN, PGS.TS NGUYỄN THỊ HỒNG HẠNH 86 Quản lý bãi chôn lấp chất thải rắn sinh hoạt tại Việt Nam - Thực trạng và giải pháp
THS TẠ HỒNG ÁNH, PGS.TS VŨ THỊ PHƯƠNG THẢO, PGS.TS NGHIÊM VÂN KHANH 91 Đánh giá ảnh hưởng của nghẽn dòng đến các yếu tố phơi lộ ô nhiễm tại sông suối miền núi phía Bắc Việt Nam: Khung sàng lọc rủi ro theo quy mô đoạn suối
PGS.TS NGUYỄN THỊ NGỌC DUNG, THS PHẠM HUY BẰNG 96 Đề xuất Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh - Kết quả khảo sát tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An năm 2026
PGS.TS ĐÀO SỸ ĐÁN 100 Nghiên cứu phỏng đoán lún để đánh giá mức độ phá hoại của các công trình hiện hữu khi thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM
PGS.TS HOÀNG QUỐC LONG, PGS.TS PHẠM ĐỨC TIỆP, PGS.TS VŨ NGỌC QUANG 104 Phân tích ổn định ba chiều mái dốc công trình đặc thù bằng phương pháp cân bằng giới hạn
TS NGUYỄN THỊ HOÀI AN 108 Các yêu cầu kỹ thuật đối với hệ thống con vận hành đảm bảo vận hành liên thông trong mạng lưới đường sắt đô thị Hà Nội
NGUYỄN ANH TUẤN, TRẦN VŨ VĂN HÒA, PHAN QUỐC CƯỜNG, LÂM BẢO HOÀNG, ĐẶNG THÁI SƠN, TRƯƠNG THANH TÙNG 111 Khả năng và giới hạn của phương pháp so sánh ảnh Sentinel-1 trước - sau trong kiểm kê ngập lụt: Kiểm chứng qua 9 đợt lũ tại Hà Tĩnh, giai đoạn 2015 - 2023
THS.NCS ĐỖ QUANG THÀNH, TS VŨ HỮU TRƯỜNG, PGS.TS LÊ THANH CƯỜNG 116 Tối ưu thể tích bê tông kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu bằng thuật toán tối ưu sao biển (SFOA)
ĐÀO CÔNG BÌNH, NGUYỄN PHÙNG TÀI LONG, NGUYỄN THANH HÀ, DƯƠNG THANH QUỲNH, NGUYỄN MẠNH CƯỜNG 120 Nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu đến khả năng chịu cắt của sàn phẳng bê tông cốt thép
TS NGUYỄN LỘC KHA 126 Một số nội dung báo cáo và tính toán cột composite sử dụng cho nhà cao tầng, trụ cầu theo tiêu chuẩn AISC 360 và ACI 318
TS ĐỖ TIẾN THỌ, TS NGUYỄN HUỲNH TẤN TÀI 129 Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa rỗng thoát nước sử dụng nhựa đường polymer và đánh giá khả năng kháng hằn lún trong điều kiện Việt Nam

INDUSTRY MANAGEMENT

THANH NGA 8 Railway investment linked to mastering technology

DUONG DINH TRUNG 10 Unified ITS architecture for network-wide data connectivity across expressways

FROM POLICY TO LIFE

NGUYEN TAT THANG 14 Management and functional conversion of surplus land parcels following road expansion in Hanoi: International experience and proposals for integrated solutions

DO HAU, NGO VIET HUNG 18 Removing bottlenecks in the renovation and redevelopment of old apartment complexes in Hanoi

VU THI VINH 22 Smart fountains in shaping identity and developing public spaces in Hanoi

NGUYEN HUY HOACH 26 Vietnam's carbon market: Linking emission reductions with energy security and green transition

PHAM THANH TUNG 30 Hoan Kiem Lake...

TALK WITH EXPERTS

TRAN THI VIET NGA 34 The water challenge and the story of urban operations

SCIENCE FORUM

HOANG MANH NGUYEN, TRAN PHUONG ANH 40 Selecting interior materials using a low-emission, life-cycle approach in construction projects

PERSPECTIVE TO PRACTICAL

NGUYEN HOANG LINH 46 TOD and a long-term vision for social housing

ENTERPRISE 4.0

NGOC HA 48 CONINCO: Optimizing internal strength, confidently reaching new heights

YEN THU 50 Phuc Dat Tan Uyen: Milestones in social housing construction in Ho Chi Minh City

PV 52 Sola - Creating a healthy life through the things close at hand

TRANSPORTATION SAFETY

DAI THANG 54 Quang Ngai coordinates efforts to eliminate unauthorized crossings and ensure railway safety

VAN HUNG 56 RECAF Khanh Hoa Project: Connecting resources, fostering sustainable development

ABOUT NEW BOOK

AN NHIEN 57 Hai Phong's Architectural Heritage: From port city imprint to development resource

SCIENTIFIC RESEARCH

HOANG BAO TRAM, HOANG HAM MY 58 Mixed-use real estate development in TOD areas in Hanoi: Potential and key issues

CAO THANH NGHIEP, NGUYEN QUOC THONG, PHAM NGOC TUAN 62 Transformation of Ho Chi Minh City's urban spatial structure in the new context

DO MINH PHUC 67 An implementation framework for urban flood risk governance in smart City development in Vietnam

LE NGOC HAI, TRAN XUAN HIEU, LE MINH KHUE, VUONG XUAN CAN 72 A Bottom-Up approach to the redevelopment planning of old apartment complexes in Hanoi

DO TRONG CHUNG 77 Current status and challenges of new technologies in the design and construction of rural housing architecture in Vietnam

TRAN LE VINH TRA, NGO THI KIM DUNG 82 Changes in the architectural value system of Khmer buddhist temples in Southwestern Vietnam in the contemporary context and conservation orientations

DUONG THI THANH XUYEN, NGUYEN THI HONG HANH 86 Municipal solid waste landfill management in Vietnam - Current status and solutions

TA HONG ANH, VU THI PHUONG THAO, NGHIEM VAN KHANH 91 Effects of headwater channel blockage on pollution exposure in river basins of the Northern Mountainous region of Vietnam: A Framework for reach scale risk screening

NGUYEN THI NGOC DUNG, PHAM HUY BANG 96 Proposal for a Smart urban water supply management indicator set - Survey results at Nghe An water Supply Joint Stock Company 2026

DAO SY DAN 100 Settlement prediction research for assessing the damage potential of existing structures during metro tunnel construction using the TBM method

HOANG QUOC LONG, PHAM DUC TIEP, VU NGOC QUANG 104 Three-dimensional stability analysis of slopes in special engineering structures using the limit equilibrium method

NGUYEN THI HOAI AN 108 Technical specifications for interoperability of subsystems operation within the Hanoi urban railway network

NGUYEN ANH TUAN, TRAN VU VAN HOA, PHAN QUOC CUONG, LAM BAO HOANG, DANG THAI SON, TRUONG THANH TUNG 111 Capability and limitations of bi-temporal Sentinel-1 change detection for flood inventory mapping: Validation against 9 documented flood events in Ha Tinh province, 2015 - 2023

DO QUANG THANH, VU HUU TRUONG, LE THANH CUONG 116 Concrete volume optimization of the retaining wall behind the jetty using the starfish optimization algorithm (SFOA)

DAO CONG BINH, NGUYEN PHUNG TAI LONG, NGUYEN THANH HA, DUONG THANH QUYNH, NGUYEN MANH CUONG 120 A study on the effects of material properties on the shear capacity of reinforced concrete slabs

NGUYEN LOC KHA 126 Selected aspects of the design and analysis of composite columns for high - rise buildings and bridge piers according to AISC 360 and ACI 318

DO TIEN THO, NGUYEN HUYNH TAN TAI 129 Mix design and rutting resistance of polymer-modified porous asphalt for Vietnamese conditions

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

10.2026 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

TS TRẦN TRUNG HIẾU 134 Đánh giá khả năng ứng dụng bê tông geopolymer tro bay sử dụng cát biển cho mặt đường lắp ghép trên đường giao thông nông thôn tại Việt Nam

PGS.TS HỒ VĂN QUÂN, THS PHẠM THÁI UYẾT, KS NGUYỄN TRƯỜNG THỊNH 140 Ảnh hưởng của nhũ tương nhựa đường đến độ hấp thụ nước, độ thấm ion clo, hiệu quả kinh tế và tác động môi trường của bê tông xi măng - xỉ lò cao dùng cho mặt đường ô tô

TS PHẠM HOÀNG, TS NGÔ VIỆT ĐỨC 145 Phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông

THS.KTS NGUYỄN NGỌC THI 148 Từ dữ liệu thiên văn đến trực quan hóa chiếu sáng bằng AI: Một phương pháp dẫn xuất hình học trong kiến trúc

HUỲNH BÁ HỌC, NGUYỄN ĐỨC PHÁT, NGUYỄN THỊ BÍCH LIỄU 154 Phân tích tĩnh cho tấm composite nhiều lớp dựa trên hàm biến dạng cắt bậc ba Chebyshev sử dụng IGA

PGS.TS NGUYỄN ĐÌNH THẠCH 159 Xây dựng hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu hàng hải sử dụng AIS và LiDAR cho phương tiện mặt nước không người lái phục vụ giám sát giao thông đường thủy

THS TRƯƠNG MINH HÒA 164 Nghiên cứu đề xuất mô hình cảng thông minh tại Việt Nam nhằm nâng cao hiệu quả khai thác vận tải và logistics gắn với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính

TS VŨ SƠN TÙNG, THS VŨ ĐỨC TOÀN 168 Nghiên cứu bộ tự động điều khiển cập cầu trượt sửa lỗi cho tàu biển sử dụng bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi

PGS.TS TRẦN THỊ KIM ĐĂNG, TS NGUYỄN TRỌNG DŨNG 172 Ứng dụng phương pháp phân đoạn hình học sử dụng dữ liệu GIS từ nguồn bản đồ mở xác định yếu tố hình học đường bộ

PGS.TS NGUYỄN TRÍ TÁ 178 Nghiên cứu thực nghiệm xác định quy luật lan truyền sóng nổ trong môi trường cát

PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI, TS THẠCH MINH QUÂN, THS TRẦN THỊ KIM THANH 183 Hoàn thiện cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng (taxi, xe buýt) sang sử dụng điện tại Việt Nam: Thực trạng và giải pháp

THS.NCS NGUYỄN THỊ NHƯ KIM, TS MAI BÁ LĨNH 188 Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam

THS LÊ HỒNG QUÂN, PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG 193 Ứng dụng mô hình chuỗi Markov trong phân tích động thái dịch chuyển thị phần giữa các bến cảng container tại Cảng Hải Phòng

THS TRẦN MINH ĐỨC, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI 196 Nghiên cứu các yếu tố rủi ro liên quan đến cộng đồng dân cư trong dự án đầu tư xây dựng công trình giao thông sử dụng vốn đầu tư công tại Việt Nam

THS TRẦN THỊ XUÂN THU 200 Năng lực thu hút và duy trì tuyến tàu tại Cảng Tân Cảng Hiệp Phước: Bằng chứng từ dữ liệu khai thác

TS HOÀNG NGỌC SƠN 204 Truy vết quyết định trong biến động chi phí dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước

TS MAI BÁ LĨNH 210 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

KS TRẦN NHẬT MINH, TS ĐẶNG VĂN PHÚ 214 Phân tích các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý chất lượng công trình Nhà máy Thủy điện Trị An mở rộng bằng mô hình tích hợp Delphi-AHP

THS NGÔ TOÀN THẮNG, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI, TS ĐỖ THỊ HUYỀN 218 Xác lập chỉ tiêu kiểm soát trong quản lý khai thác cơ sở vật chất tại các cơ sở giáo dục đại học công lập Việt Nam bằng phương pháp Fuzzy Delphi

THS.NCS VŨ QUANG ANH 222 Nghiên cứu mô hình quản lý đường sắt đô thị gắn với phát triển TOD của Thủ đô Hà Nội đến năm 2035, tầm nhìn đến năm 2045

THS TRẦN ĐỨC ĐẠT, TS ĐỖ VĂN THUẬN, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI 226 Nghiên cứu tổng quan các chiến lược giảm thiểu phát thải và bài học cho ngành Xây dựng Việt Nam

BÙI QUANG LUẬN, NGUYỄN VĂN MINH 230 Xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu xây dựng dân dụng: Nghiên cứu tại TP Hồ Chí Minh

THS.NCS HÀ ANH TUẤN, PGS.TS NGUYỄN NGỌC PHƯƠNG, GS.TS ĐINH TUẤN HẢI 234 Một số giải pháp quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng tại TP Hà Nội theo định hướng phát triển bền vững

THS.NCS BÙI VĂN NHẬT, PGS.TS NGUYỄN ANH THƯ 238 Quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách nhà nước

ĐẶNG VĂN THƯƠNG, HUỲNH PHÚC TRƯỜNG 244 Đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp cho doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ tại Việt Nam

THS TRẦN THỊ KIM THANH, TS THẠCH MINH QUÂN, PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI 245 Xu hướng điện hóa giao thông công cộng và hàm ý chính sách cho Việt Nam: Trường hợp xe buýt và taxi

TS TRẦN NGỌC HUY, TS BÙI NGỌC HƯNG, TS ĐẶNG MINH TÂN, THS VŨ QUANG HUY, KS TRỊNH VIỆT HOÀNG, KS ĐẶNG TRẦN TUẤN 252 Đánh giá tốc độ vận hành trên một số tuyến quốc lộ khu vực Đồng bằng Bắc Bộ và định hướng xác định tốc độ khai thác cho các tuyến đường bộ ở Việt Nam

PGS.TS AN THỊ HOÀI THU ANH, TS TRẦN VĂN KHÔI 259 Ứng dụng LQR, MPC và FD trong điều khiển chuyển động ngang của xe tự hành

TRẦN VŨ TỰ, ĐỖ HỮU THỜI, NGUYỄN MINH THIỆN 264 So sánh ứng xử cơ học của kết cấu mặt đường nhựa dưới tác động của các loại xe rơ moóc khác nhau bằng phương pháp phần tử hữu hạn

NGUYỄN THÀNH NHÂN, LƯU TẤN LỢI, MẠC ĐỨC HÙNG, PHAN THẾ VINH, TRẦN ĐỒNG KIẾM LAM 270 Ứng xử cơ học của gạch tự chèn tạo từ hỗn hợp xi măng-cát-cao su tái chế: Ảnh hưởng của hàm lượng cao su và năng lượng đầm lèn

BOUNYONG SICHANTHALA, NGUYỄN ANH ĐỨC, TRẦN VĂN TẤN 276 Khung đánh giá sự sẵn sàng cho đầu tư theo phương thức đối tác công tư trong hạ tầng giáo dục: Trường hợp nghiên cứu tại Lào

TRAN TRUNG HIEU	134	Assessment of the applicability of sea-sand fly ash geopolymer concrete for precast rural road pavements in Vietnam
HO VAN QUAN, PHAM THAI UYET, NGUYEN TRUONG THINH	140	Effects of asphalt emulsion on water absorption, chloride ion permeability, economic efficiency and environmental impact of blast furnace slag-cement concrete for pavements
PHAM HOANG, NGO VIET DUC	145	A method for determining the chloride ion diffusion coefficient in concrete
NGUYEN NGOC THI	148	From astronomical data to AI-assisted architectural lighting visualization: A geometric derivation method
HUYNH BA HOC, NGUYEN DUC PHAT, NGUYEN THI BICH LIEU	154	Static analysis of laminated composite plates using a chebyshev-based third-order shear deformation function and isogeometric analysis
NGUYEN DINH THACH	159	Development of an AIS-LiDAR maritime data acquisition and processing system for unmanned surface vehicles in waterway traffic monitoring
TRUONG MINH HOA	164	Proposed smart port development model in Vietnam to enhance transport and logistics efficiency while supporting greenhouse gas emission reduction goals
VU SON TUNG, VU DUC TOAN	168	Fault-tolerant sliding auto-berthing controller for marine surface vessel with adaptive sliding mode disturbance observer
TRAN THI KIM DANG, NGUYEN TRONG DUNG	172	Application of geometric segmentation method using open-source GIS data to determine road alignment geometric elements
NGUYEN TRI TA	178	Experimental study to determine the law of explosion wave propagation in sand environments
NGUYEN HONG THAI, THACH MINH QUAN, TRAN THI KIM THANH	183	Improving mechanisms and policies to encourage the transition of public transport vehicles (taxis and buses) to electric power in Vietnam: Current status and solutions
NGUYEN THI NHU KIM, MAI BA LINH	188	A study on the factors determining the choice of air freight services by import-export enterprises in Vietnam
LE HONG QUAN, DANG CONG XUONG	193	Application of Markov chain approach to analyze market share dynamics among container terminals in Haiphong Port
TRAN MINH DUC, NGUYEN LUONG HAI	196	A study of project risk factors related to local communities in publicly funded transport infrastructure projects in Vietnam
TRAN THI XUAN THU	200	Capability to attract and retain liner services at Tancang Hiep Phuoc Port: Evidence from operating data
HOANG NGOC SON	204	Tracing decisions in cost variations of state-funded construction investment projects
MAI BA LINH	210	Analysis of international environmental changes and their impacts on Vietnam's transportation and logistics industry to enhance logistics management efficiency in the current context
TRAN NHAT MINH, DANG VAN PHU	214	Analysis of factors affecting quality management of the Tri An Hydropower Plant Expansion project using an integrated Delphi-AHP model
NGO TOAN THANG, NGUYEN LUONG HAI, DO THI HUYEN	218	Identifying control indicators for facility utilization management in Vietnamese public higher education institutions using the Fuzzy Delphi Method
VU QUANG ANH	222	Research on the urban railway management model integrated with TOD development in Hanoi Capital: Period up to 2035, with a vision to 2045
TRAN DUC DAT, DO VAN THUAN, NGUYEN LUONG HAI	226	A literature review of emission mitigation strategies and lessons for the Vietnamese construction sector
BUI QUANG LUAN, NGUYEN VAN MINH	230	Developing a framework for assessing circular economy implementation of building contractors: a study in Ho Chi Minh City
HA ANH TUAN, NGUYEN NGOC PHUONG, DINH TUAN HAI	234	Selected solutions for improving state management of construction activities in Hanoi Towards sustainable development
BUI VAN NHAT, NGUYEN ANH THU	238	Risk management during the construction phase of hospital projects funded by non-state budget sources
DANG VAN THUONG, HUYNH PHUC TRUONG	244	A Proposal for Low-Cost digital transformation strategies for small and medium construction enterprises in Vietnam
TRAN THI KIM THANH, THACH MINH QUAN, NGUYEN HONG THAI	245	Electrification trends in public transport and policy implications for Vietnam: The case of buses and taxis
TRAN NGOC HUY, BUI NGOC HUNG, DANG MINH TAN, VU QUANG HUY, TRINH VIET HOANG, DANG TRAN TUAN	252	Assessment of operating speeds on selected national highways in the Borthern Delta Region and orientations for determining operational speeds for roads in vietnam
AN THI HOAI THU ANH, TRAN VAN KHOI	259	Application of LQR, MPC and feedforward control in the lateral control of autonomous vehicles
TRAN VU TU, DO DUY THOI, NGUYEN MINH THIEN	264	Comparative analysis of the mechanical responses of asphalt pavements under different container truck configurations by using finite element analysis
THANH NHAN NGUYEN, TAN LOI LUU, DUC HUNG MAC, THE VINH PHAN, DONG KIEM LAM TRAN	270	Mechanical behavior of cement-sand-rubber interlocking blocks with Different rubber contents and compaction energies
BOUNYONG SICHANTHALA, NGUYEN ANH DUC, TRAN VAN TAN	276	A five-pillar readiness framework for publicprivate partnerships in education infrastructure: Evidence from Laos

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

Đầu tư đường sắt gắn với làm chủ công nghệ

THANH NGA

Đầu tư đường sắt cần gắn với khả năng làm chủ công nghệ và phát triển sản xuất trong nước. Các nhiệm vụ nghiên cứu vừa được Bộ Xây dựng phê duyệt là bước cụ thể hóa yêu cầu này, hướng tới nâng năng lực tham gia của doanh nghiệp Việt Nam trong các dự án.

TỪ YÊU CẦU TỰ CHỦ ĐẾN NHỮNG NHIỆM VỤ CỤ THỂ

Ngày 15/9/2026, Bộ Xây dựng ban hành 3 quyết định phê duyệt nhiệm vụ nghiên cứu công nghệ đường sắt. Quyết định số 1614/QĐ-BXD tập trung vào sản xuất ray, phụ kiện, bộ ghi đường sắt đô thị và ray, phụ kiện đường sắt tốc độ cao; Quyết định số 1615/QĐ-BXD nghiên cứu kết cấu đường ray cho đường sắt tốc độ cao và Quyết định số 1616/QĐ-BXD nghiên cứu công nghệ xử lý đất yếu nền đường và vùng chuyển tiếp công trình. Sau đó, Bộ thông báo kế hoạch đặt hàng để tuyển chọn tổ chức thực hiện.

3 nhiệm vụ tập trung vào những phần liên quan trực tiếp đến xây dựng tuyến đường: xử lý nền đất, phát triển kết cấu đường ray và sản xuất ray, phụ kiện. Việc xác định từng nhiệm vụ giúp làm rõ công nghệ cần nghiên cứu, sản phẩm cần tạo ra và năng lực phải chuẩn bị.

Hướng đi này đã được Chính phủ đặt ra từ năm 2025. Tại phiên họp thứ hai Ban Chỉ đạo các công trình, dự án quan trọng quốc gia lĩnh vực đường sắt ngày 26/4/2025, Thủ tướng Chính phủ yêu cầu tiếp nhận chuyển giao và làm chủ công nghệ hiện đại; giao Bộ Công Thương xây dựng Đề án phát triển công nghiệp đường sắt. Bộ Xây dựng được giao huy động doanh nghiệp có năng lực tham gia, trong đó có VNPT, Viettel nghiên cứu tiếp nhận, phát triển công nghệ thông tin, tín hiệu và điều khiển.

Đến phiên họp ngày 03/3/2026, Thủ tướng Chính phủ tiếp tục yêu cầu chủ động làm chủ công nghệ, quản lý và sản xuất hệ thống thiết bị; tạo điều kiện cho doanh nghiệp trong nước tham gia, nội địa hóa tối đa trong khả năng có thể.

Quyết định 21/2026/QĐ-TTg ngày 30/4/2026 của Thủ tướng Chính phủ ban hành Danh mục công nghệ chiến lược và Danh mục sản phẩm công nghệ chiến lược, đưa công nghệ đường sắt tốc độ cao, đường sắt đô thị vào Danh mục công nghệ chiến lược, có hiệu lực từ ngày 01/7/2026. Đây là một mốc chính sách quan trọng trong quá trình chuẩn bị năng lực công nghệ cho lĩnh vực này.

Các hoạt động trên cho thấy, yêu cầu tự chủ đang được triển khai bằng những công việc cụ thể. Điểm đáng chú ý, việc nghiên cứu công nghệ và chuẩn bị năng lực sản xuất trong nước được đặt ra ngay trong quá trình chuẩn bị dự án. Nếu thực hiện tốt, doanh nghiệp Việt Nam có điều kiện tham gia sớm, xác định phần việc phù hợp và chuẩn bị nguồn lực.

Tuy nhiên, phê duyệt nhiệm vụ mới là bước đầu. Năng lực công nghệ phải được chứng minh bằng kết quả nghiên cứu, chất lượng sản phẩm và khả năng sử dụng trong thực tế. Đây cũng là điểm cần phân biệt khi đánh giá tiến độ triển khai chính sách với kết quả làm chủ công nghệ.

CHUYỂN GIAO PHẢI GẮN VỚI KHẢ NĂNG TIẾP NHẬN

Chuyển giao công nghệ phụ thuộc cả vào năng lực của bên tiếp nhận. Doanh nghiệp cần có cơ sở sản xuất, tài chính và đội ngũ kỹ thuật đủ sức vận hành, duy trì công nghệ sau khi bàn giao.

Nghị định 319/2025/NĐ-CP ngày 12/12/2025 của Chính phủ quy định chi tiết nội dung, trình tự, thủ tục, thẩm quyền để triển khai các cơ chế, chính sách đặc thù, đặc biệt về phát triển khoa học, công nghệ, nghiên cứu, ứng dụng, chuyển giao công nghệ đối với công trình trọng điểm, dự án quan trọng quốc gia lĩnh vực đường sắt theo các Nghị quyết của Quốc hội, đã quy định tiêu chí lựa chọn tổ chức, doanh nghiệp được giao nhiệm vụ hoặc đặt hàng nhận chuyển giao công nghệ phục vụ dự án đường sắt. Các yêu cầu gồm: cơ sở vật chất phù hợp, nguồn lực tài chính, đội ngũ đủ năng lực tiếp nhận và vận hành, kế hoạch huy động nguồn lực, cùng cam kết hoàn thành việc làm chủ công nghệ. Chủ đầu tư phải xác định yêu cầu cụ thể phù hợp với loại công nghệ cần chuyển giao.

Quy định này đặt trách nhiệm rõ hơn cho chủ đầu tư và doanh nghiệp. Chủ đầu tư phải xác định công nghệ cần tiếp nhận và yêu cầu đối với đơn vị thực hiện. Doanh nghiệp phải chuẩn bị nguồn lực tương ứng, thay vì chỉ đăng ký tham gia

rồi mới tính đến nhà xưởng, thiết bị và nhân lực.

Vì vậy, lựa chọn đơn vị tiếp nhận cần căn cứ vào khả năng thực hiện công việc. Kế hoạch đào tạo phải gắn với vị trí kỹ thuật cụ thể. Phương án đầu tư nhà xưởng phải phù hợp với sản phẩm, quy trình sản xuất và yêu cầu kiểm tra chất lượng.

Tại Thông báo 217/TB-VPCP ngày 28/4/2026, Phó Thủ tướng Thường trực Phạm Gia Túc yêu cầu việc lựa chọn đối tác phải gắn với điều kiện chuyển giao công nghệ cho Việt Nam. Bộ Xây dựng đồng thời được yêu cầu bố trí chi phí đào tạo trong các dự án để bảo đảm khả năng tự chủ vận hành, khai thác và bảo trì.

Từ yêu cầu này, nội dung chuyển giao cần được làm rõ trong hồ sơ và hợp đồng: tài liệu được bàn giao, quyền sử dụng, nội dung đào tạo và công việc phía Việt Nam có thể tự thực hiện sau đó. Kết quả cần được đánh giá bằng khả năng làm việc của đội ngũ tiếp nhận. Số khóa học hay số tài liệu được bàn giao chưa đủ để xác định mức độ làm chủ.

Với 3 nhiệm vụ nghiên cứu vừa được phê duyệt, yêu cầu phối hợp cũng cần được chú ý. Nền đất, kết cấu đường ray, ray và phụ kiện cùng phục vụ một hệ thống. Kết quả nghiên cứu từng phần phải phù hợp với yêu cầu kỹ thuật chung, có thể kết hợp và kiểm chứng trong điều kiện sử dụng dự kiến. Nếu thiếu sự phối hợp từ đầu, quá trình ứng dụng sẽ phải xử lý thêm những khác biệt giữa các sản phẩm.

SẢN XUẤT PHẢI DỰA VÀO NHU CẦU CỦA DỰ ÁN

Nghiên cứu công nghệ cần gắn với nhu cầu sử dụng. Doanh nghiệp khó quyết định đầu tư dây chuyền, thiết bị và nhân lực nếu chưa rõ sản phẩm sẽ phục vụ dự án nào, theo tiêu chuẩn gì, với quy mô và thời gian cung ứng ra sao.

Vấn đề này được nêu tại cuộc họp về Tổ hợp Công nghiệp đường sắt ngày 15/9/2026. Ông Nguyễn Danh Huy - khi đó là Thứ trưởng Bộ Xây dựng, lưu ý mô hình tổ hợp có kỹ thuật phức tạp, chi phí đầu tư lớn và thời gian thu hồi vốn dài. Vì vậy, việc nghiên cứu tổ hợp phải gắn với các dự án hạ tầng để xác định nhu cầu sản phẩm từ thiết kế, xây dựng, mua sắm thiết bị đến vận hành, bảo trì. Ông Nguyễn Danh Huy đồng thời đề nghị đánh giá khả năng tham gia của doanh nghiệp trong nước, tỷ lệ nội địa hóa, chi phí và lộ trình thực hiện.

Ý kiến này cho thấy, nhu cầu của các dự án là căn cứ quan trọng để xác định phương án đầu tư sản xuất. Nhà máy cần có sản phẩm phù hợp, công nghệ có thể tiếp nhận và thị trường đủ để duy trì hoạt động. Quy mô đầu tư phải được tính toán cùng những điều kiện đó.

Văn bản 1251/TTg-CN ngày 07/10/2026 của Thủ tướng Chính phủ về tổ chức lập Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Tổ hợp Công nghiệp đường sắt, giao Bộ Xây dựng chủ trì lập Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Tổ hợp Công nghiệp đường sắt. Báo cáo phải làm rõ chủng loại sản phẩm, khả năng tiếp nhận và làm chủ công nghệ, hiệu quả đầu tư, hình thức đầu tư từng dự án thành phần; ưu tiên thu hút nguồn lực xã hội.

Những yêu cầu này cần được xem xét cùng nhau. Chủng loại và nhu cầu sản phẩm quyết định công nghệ cần lựa chọn. Khả năng tiếp nhận công nghệ, nguồn lực của doanh nghiệp và hiệu quả đầu tư sẽ giúp xác định quy mô, hình thức đầu tư phù hợp. Làm rõ từng nội dung sẽ hạn chế việc lựa chọn quy mô lớn khi điều kiện sản xuất và thị trường chưa được đánh giá đầy đủ.

Đến thời điểm này, các nhiệm vụ nghiên cứu đã cụ thể hóa một phần mục tiêu làm chủ công nghệ đường sắt. Thời gian tới, việc thực hiện cần gắn với nhu cầu dự án, lựa chọn đơn vị đủ năng lực tiếp nhận và chuẩn bị nhân lực cho sản xuất, vận hành, bảo trì. Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Tổ hợp Công nghiệp đường sắt phải làm rõ sản phẩm, khả năng làm chủ công nghệ và hiệu quả đầu tư theo yêu cầu của Thủ tướng Chính phủ tại Văn bản 1251/TTg-CN. Đây là những căn cứ để xác định khả năng tham gia thực tế của doanh nghiệp Việt Nam và lộ trình phát triển công nghiệp đường sắt trong nước.❖

Kiến trúc ITS thống nhất để kết nối dữ liệu toàn mạng lưới cao tốc

THS DƯƠNG ĐÌNH TRUNG*

Mục tiêu đạt 5.000 km đường cao tốc vào năm 2030 đặt ra yêu cầu quản lý giao thông dựa trên dữ liệu. Kiến trúc ITS Quốc gia cần xác định thống nhất dịch vụ, chức năng và tiêu chuẩn kết nối, khắc phục tình trạng hệ thống riêng lẻ và hạn chế phụ thuộc công nghệ đóng.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Mạng lưới đường bộ Việt Nam đang phát triển với mục tiêu đạt 5.000 km đường cao tốc vào năm 2030. Cùng với sự gia tăng phương tiện cơ giới, quy mô này đặt ra yêu cầu chuyển phương thức quản lý giao thông từ thủ công sang hiện đại, dựa trên dữ liệu.

Tuy nhiên, các hệ thống giao thông thông minh (ITS) được triển khai thời gian qua còn mang tính cục bộ. Những tuyến cao tốc do Nhà nước, VEC hoặc các nhà đầu tư BOT, PPP thực hiện sử dụng những chuẩn riêng, thiếu khả năng chia sẻ dữ liệu thời gian thực. Hệ thống có thể đáp ứng nhu cầu trên từng tuyến nhưng gặp khó khăn khi kết nối để quản lý toàn mạng lưới.

Một vấn đề khác là nguy cơ phụ thuộc công nghệ đóng của nhà cung cấp. Khi thiết bị ngoại vi sử dụng giao thức riêng, việc nâng cấp, mở rộng hoặc tích hợp hệ thống có thể phát sinh chi phí lớn. Những hạn chế này cũng ảnh hưởng đến khả năng tiếp nhận AI, dữ liệu lớn, giao tiếp giữa phương tiện với hạ tầng và xe tự hành.

Vì vậy, xây dựng Kiến trúc ITS Quốc gia cần đi trước việc triển khai các hệ thống thành phần. Kiến trúc phải làm rõ dịch vụ cần cung cấp, chức năng phải thực hiện, các bên tham gia và dữ liệu cần trao đổi. Đây là cơ sở để từng dự án lựa chọn công nghệ và chuẩn bị kết nối ngay từ khâu thiết kế.

Hiện có 26/35 tuyến đường cao tốc trên toàn quốc đã được đầu tư ITS (theo số liệu của Cục Đường bộ Việt Nam, tháng 9/2026), gồm: Hà Nội - Hải Phòng, Hạ Long - Vân Đồn, Vân Đồn - Móng Cái, Pháp Vân - Cầu Giẽ, Cầu Giẽ - Ninh Bình, Mai Sơn - QL45, QL45 - Nghi Sơn, Nghi Sơn - Diễn Châu, Diễn Châu - Bãi Vọt, Bãi Vọt - Hàm Nghi, Hàm Nghi - Vũng Áng, Vũng Áng - Bùng, Bùng - Vạn Ninh, Vạn Ninh - Cam Lộ, Quảng Ngãi - Hoài Nhơn, Hoài Nhơn - Quy Nhơn, Quy Nhơn - Chí Thạnh, Chí Thạnh - Vân Phong, Vân Phong - Nha Trang, Nha Trang - Cam Lâm, Cam Lâm - Vĩnh Hảo, Vĩnh Hảo - Phan Thiết, Phan Thiết - Dầu Giây, TP.HCM - Long Thành - Dầu Giây, TP.HCM - Trung Lương, Trung Lương - Mỹ Thuận.

TỪ NHU CẦU NGƯỜI DÙNG ĐẾN TIÊU CHUẨN KẾT NỐI

Kiến trúc ITS Quốc gia là khung tham chiếu xác định cấu trúc, thành phần chức năng, đối tượng vật lý, giao thức truyền thông và luồng dữ liệu giữa các bên. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy, khung này cần bao quát cả quan hệ tổ chức, nghiệp vụ và công nghệ.

Tại Hoa Kỳ, Kiến trúc tham chiếu cho giao thông hợp

Kiến trúc ARC-IT của Hoa Kỳ

(*) *Cục Đường bộ Việt Nam*

Mạng lưới cao tốc mở rộng đặt ra yêu cầu kết nối dữ liệu giữa các trung tâm quản lý, điều hành giao thông (Nguồn: Cục Đường Bộ Việt Nam).

tác và thông minh (ARC-IT phiên bản 9.3), cung cấp khung chung để quy hoạch, xác định và tích hợp các hệ thống ITS. Kiến trúc gồm 4 góc nhìn: doanh nghiệp, chức năng, vật lý và truyền thông.

Góc nhìn doanh nghiệp mô tả quan hệ giữa các tổ chức và giữa tổ chức với các thành phần ITS. Đây là cách xác định những bên cùng trao đổi thông tin, quản lý hoặc vận hành hệ thống vượt ra ngoài phạm vi một đơn vị.

Góc nhìn chức năng xác định các công việc, quy trình và luồng dữ liệu cần thiết để đáp ứng yêu cầu.

Góc nhìn vật lý phân bổ những chức năng này vào thiết bị, hệ thống và hạ tầng cụ thể có thể mua sắm, triển khai.

Góc nhìn truyền thông làm rõ giao thức, tiêu chuẩn và công nghệ kết nối. Mỗi luồng thông tin gồm: nguồn gửi, thông tin trao đổi và nơi nhận, được gắn với các tiêu chuẩn hoặc đặc tả. Cách tổ chức này tạo cơ sở để những thành phần do các bên khác nhau cung cấp có thể tương tác.

Châu Âu tiếp cận qua FRAME-NEXT, xác định chức năng và dịch vụ từ nhu cầu nghiệp vụ trước khi lựa chọn công nghệ. 4 lớp được trình bày theo những câu hỏi cụ thể: ai cần gì; hệ thống làm gì; thành phần nào trao đổi thông tin gì; triển khai bằng phương tiện nào?

FRAME 4.1 chứa khoảng 2.000 - 3.000 phần tử chức năng tổng hợp. Quy mô này cho thấy, ITS bao gồm nhiều công việc và quan hệ dữ liệu cần được phân tích trước khi chuyển thành giải pháp triển khai.

FRAME-NEXT bổ sung các tình huống sử dụng cho giao thông hợp tác và phương tiện kết nối, làm rõ vai trò các bên, đồng thời phát triển những gói kiến trúc cho 3 lĩnh vực ưu tiên: cuộc gọi khẩn cấp eCall, giao thông hợp tác C-ITS và Điểm truy cập quốc gia (NAP).

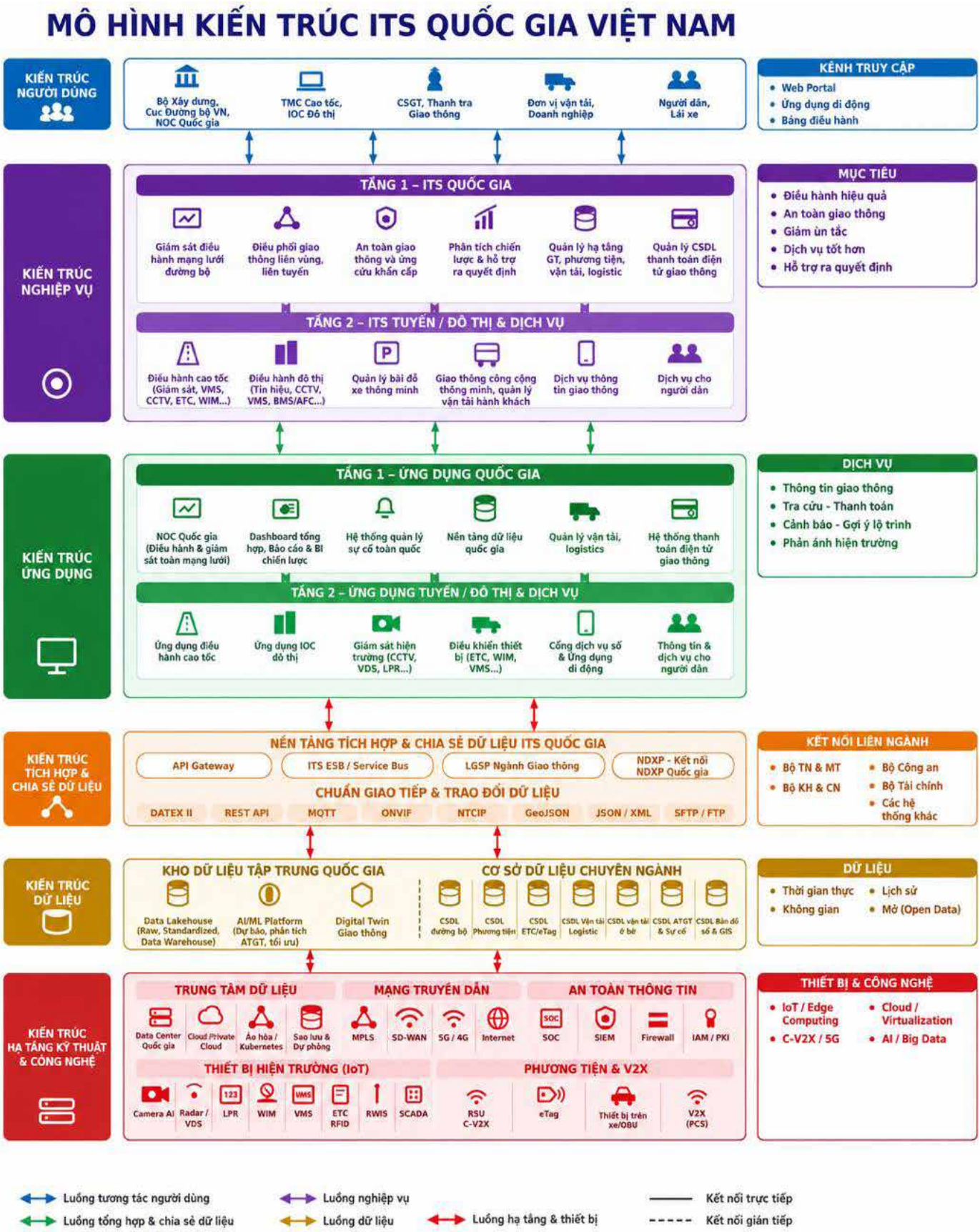
Bộ tiêu chuẩn ISO 14813 cung cấp mô hình kiến trúc tham

Phát triển kiến trúc ITS từ kiến trúc Frame.

chiếu ITS. Việt Nam đã có TCVN 12836-1:2020 trên cơ sở ISO 14813-1:2015, đặc tả các miền, nhóm dịch vụ và dịch vụ ITS. Với phương án đang đề xuất bao gồm 8 lĩnh vực dịch vụ ITS, gồm: (1) Quản lý, giám sát, điều hành giao thông đường bộ; (2) Thanh toán điện tử giao thông đường bộ; (3) Quản lý phương tiện vận tải; (4) Cung cấp thông tin giao thông; (5) An toàn giao thông và ứng cứu khẩn cấp; (6) Quản lý bãi đỗ xe thông minh; (7) Giao thông công cộng thông minh; (8) Quản lý hạ tầng giao thông, khung 8 lĩnh vực dịch vụ ITS.

6 BƯỚC CHUYỂN YÊU CẦU QUẢN LÝ THÀNH HỆ THỐNG CÓ THỂ TRIỂN KHAI

Đối với Việt Nam, phương pháp xây dựng Kiến trúc ITS Quốc gia cần theo hướng chức năng, phù hợp với điều kiện phát triển và nhu cầu thực tế. Quá trình được đề xuất qua 6 bước liên kết với nhau.



Kiến trúc ITS Quốc gia đề xuất.

Bước thứ nhất là xây dựng mô hình kiến trúc tổng thể, thể hiện toàn bộ hệ thống và giải thích cách vận hành.

Bước thứ hai là, xác định chi tiết dịch vụ người dùng. Các dịch vụ phải được lựa chọn, sắp xếp thứ tự ưu tiên và nhóm theo phạm vi ứng dụng.

Bước thứ ba là xây dựng kiến trúc logic. Mỗi dịch vụ được phân tích thành các chức năng hoặc quy trình kỹ thuật, cùng dữ liệu cần trao đổi. Đây là bước làm rõ hệ thống phải thực hiện công việc gì để đáp ứng nhu cầu.

Bước thứ tư là xây dựng kiến trúc vật lý, xác định các phân hệ, đối tượng tương tác và luồng thông tin. Những chức năng đã xác định được phân bổ cho các phân hệ; đầu vào, đầu ra và quan hệ trao đổi cũng được làm rõ.

Bước thứ năm là xây dựng kiến trúc truyền thông. Các luồng thông tin giữa nguồn gửi và nơi nhận được gắn với giao thức, tiêu chuẩn cần thiết. Yêu cầu tương tác vì thế được xác định trước khi mua sắm và tích hợp thiết bị.

Bước thứ sáu là xây dựng các gói dịch vụ. Mỗi gói xác định những thành phần cần thiết để cung cấp một dịch vụ cụ thể, phù hợp với vấn đề và nhu cầu giao thông.

Trình tự này giúp kết nối yêu cầu quản lý với phương án đầu tư. Thiết bị và phần mềm được lựa chọn để thực hiện chức năng đã xác định, hỗ trợ luồng dữ liệu và đáp ứng tiêu chuẩn kết nối chung.

7 LỚP KIẾN TRÚC, AN TOÀN THÔNG TIN XUYÊN SUỐT

Kiến trúc tổng thể ITS quốc gia được đề xuất tham chiếu các khung và tiêu chuẩn quốc tế, đồng thời bảo đảm phù hợp với Khung kiến trúc Chính phủ số Việt Nam phiên bản 4.0 và Khung kiến trúc số Bộ Xây dựng phiên bản 4.0.

Mô hình gồm 7 lớp, một trục an toàn thông tin xuyên suốt và kết nối với các hệ thống trong, ngoài Bộ Xây dựng.

Lớp người sử dụng xác định những đối tượng tiếp cận hệ thống: người tham gia giao thông, doanh nghiệp vận tải, đơn vị quản lý vận hành, cảnh sát giao thông và cứu hộ.

Lớp kênh giao tiếp cung cấp website, ứng dụng di động, biển báo điện tử và các phương tiện tiếp cận phù hợp với từng nhóm.

Lớp nghiệp vụ xác định những quy trình cốt lõi, được thiết kế xuyên suốt để phục vụ tự động hóa và phân tích. Lớp ứng dụng tổ chức các nhóm phần mềm chính và ứng dụng bổ sung theo mô hình dịch vụ nhỏ, tạo khả năng phát triển linh hoạt.

Lớp nghiệp vụ phân loại theo 8 lĩnh vực dịch vụ của ISO 14813-1:2024, bao gồm: Quản lý, giám sát, điều hành giao thông đường bộ; Thanh toán điện tử giao thông đường bộ; Quản lý phương tiện vận tải; Cung cấp thông tin giao thông; An toàn giao thông và ứng cứu khẩn cấp; Quản lý bãi đỗ xe thông minh; Giao thông công cộng thông minh và Quản lý hạ tầng giao thông.

Các dịch vụ ITS lĩnh vực đường bộ Việt Nam được xây dựng dựa trên tham khảo các dịch vụ giao thông thông minh được quy định tại Nghị định 165/2024/NĐ-CP và Nghị định 241/2026/NĐ-CP, công nghệ hiện có và các dịch vụ của tổ chức tiêu chuẩn hóa quốc tế ISO 14813-1:2024, TCVN 12836-1:2020.

Lớp nền tảng số cung cấp công nghệ dùng chung cho toàn hệ thống, gồm nền tảng tích hợp, Internet vạn vật, bản đồ số, BIM, thanh toán điện tử, dữ liệu lớn và AI.

Lớp cơ sở dữ liệu được đề xuất tổ chức dữ liệu giao thông quốc gia theo 8 nhóm, phục vụ xử lý thời gian thực và phân tích chiến lược. Dữ liệu được quản lý theo mô hình Data Lake, chia thành nhiều vùng.

Lớp hạ tầng kỹ thuật xác định phần cứng và các trung tâm của hệ thống. Phương án phân bổ hạ tầng của Trung tâm ITS Quốc gia tận dụng tài nguyên Trung tâm dữ liệu quốc gia và chuẩn bị khả năng tích hợp công nghệ mới.

Hệ thống ITS quốc gia quản lý 7 nhóm dữ liệu theo phạm vi quản lý và mục đích sử dụng. Các nhóm dữ liệu này bao gồm toàn bộ dữ liệu từ các TMC tuyến cao tốc, các IOC đô thị, hệ thống ETC/WIM, và các nguồn chia sẻ liên ngành, cụ thể gồm: Dữ liệu giao thông thời gian thực; Dữ liệu sự cố & tai nạn; Dữ liệu thu phí & thanh toán; Dữ liệu tải trọng xe (WIM); Dữ liệu môi trường & thời tiết; Dữ liệu hạ tầng kỹ thuật và Dữ liệu phương tiện & logistics.

Trung tâm ITS quốc gia thuộc Bộ Xây dựng, chịu trách nhiệm vận hành nền tảng ITS Core, NOC 24/7. Trung tâm là đầu mối tích hợp, chuẩn hóa, phân tích dữ liệu toàn mạng; điều phối liên tuyến; cung cấp dữ liệu mở và API cho các bên liên quan.

An toàn thông tin được tổ chức ở 3 mức: chính sách, kỹ thuật và vật lý. Trục này phải xuyên suốt kiến trúc, bảo vệ các lớp và hoạt động trao đổi dữ liệu.

Hệ thống kết nối liên ngành qua NDXP - nền tảng tích hợp, chia sẻ dữ liệu quốc gia và LGSP nền tảng tích hợp, chia sẻ dữ liệu cấp bộ, tỉnh. Mục đích là tổ chức trao đổi dữ liệu chuẩn hóa, bảo đảm các lớp có chức năng riêng nhưng liên kết chặt chẽ.

Phương án kiến trúc đề xuất đặt mục tiêu lộ trình đến năm 2030 sẽ liên thông 100% các trung tâm quản lý, điều hành giao thông (TMC) trên toàn mạng lưới đường bộ. Để hiện thực hóa mục tiêu đề xuất này, kiến trúc được thiết kế với khả năng mở rộng linh hoạt khi nhu cầu dịch vụ tăng. Đồng thời, nền tảng hệ thống cần được chuẩn bị sẵn sàng để tiếp nhận và tích hợp các công nghệ tiên tiến như Trí tuệ nhân tạo (AI), Dữ liệu lớn (Big Data), mạng 5G, giao tiếp phương tiện vạn vật (V2X), cảm biến thông minh (IoT) và xe tự hành trong chặng đường từ nay đến năm 2030, tầm nhìn định hướng đến năm 2045.

Kiến trúc ITS quốc gia xác định những dịch vụ cần cung cấp và cấu trúc để triển khai các dịch vụ đó. Quá trình xây dựng cũng giúp làm rõ nhu cầu, vai trò các bên và quan hệ giữa những hệ thống đang được đầu tư.

Với mạng lưới cao tốc tiếp tục mở rộng, kiến trúc thống nhất cần trở thành cơ sở để thiết kế và kết nối từng hệ thống thành phần. Nguyên tắc "kiến trúc đi trước, triển khai theo sau" giúp các dự án chuẩn bị khả năng chia sẻ dữ liệu và tiếp nhận công nghệ mới ngay từ đầu.❖

QUẢN LÝ VÀ CHUYỂN ĐỔI CHỨC NĂNG QUỸ ĐẤT DƯ THỪA SAU MỞ ĐƯỜNG TẠI HÀ NỘI:

Kinh nghiệm quốc tế và đề xuất giải pháp tích hợp

TS.KTS NGUYỄN TẤT THẮNG*

Hiện tượng đất dư thừa méo mó, siêu nhỏ sau giải phóng mặt bằng mở đường là bài toán quản lý phức tạp nhưng hoàn toàn có thể giải quyết nếu có sự thay đổi căn bản về tư duy quy hoạch.

Quá trình mở rộng đường giao thông nội đô tại các đô thị lịch sử như Thủ đô Hà Nội thường tạo ra hệ lụy kéo dài về sự xuất hiện của các thửa đất dư thừa có diện tích rất nhỏ (<10 - 30 m^2) và hình hài biến dạng, méo mó. Hiện tượng này dẫn đến sự bùng nổ của kiến trúc siêu mỏng, siêu nhỏ, siêu méo… làm suy giảm nghiêm trọng chất lượng cảnh quan đô thị và an toàn công trình. Bài báo sẽ phân tích thực trạng đất dư thừa sau giải phóng mặt bằng tại Hà Nội, đối chiếu với kinh nghiệm quản lý đất đai và quy hoạch tại Nhật Bản, Hàn Quốc và một số quốc gia châu Âu… Từ đó, nghiên cứu đề xuất hệ thống giải pháp tổng thể bao gồm: cơ chế thu hồi và hợp nhất thửa đất (Excess Condemnation and Plot Consolidation), mô hình điều chỉnh đất đai (Land Readjustment) và các hướng chuyển đổi chức năng linh hoạt như công viên bỏ túi (Pocket Park), hạ tầng kỹ thuật ngầm và kiến trúc dịch vụ siêu nhỏ (Micro-architecture).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tiến trình đô thị hóa và tái thiết hạ tầng giao thông, việc mở rộng các tuyến đường nội đô xuyên qua các khu vực lõi đô thị lịch sử là giải pháp cấp bách nhằm giải quyết bài toán ùn tắc. Tuy nhiên, tại Thủ đô Hà Nội, chính sách bồi thường và giải phóng mặt bằng (GPMB) theo vạch chỉ giới đường đỏ hiện hành chỉ thu hồi đúng diện tích nằm trong chỉ giới. Hệ quả trực tiếp là sự hình thành của hàng loạt thửa đất còn lại có diện tích cực nhỏ (10 - 30 m^2), thậm chí (<10 m^2) với chiều sâu không đủ tiêu chuẩn, hình dạng méo mó (hình tam giác, hình dải ruy-băng, góc nhọn…).

Nhằm tận dụng giá trị thương mại lớn từ các "mặt tiền mới xuất hiện", người dân thường tự phát xây dựng các công trình nhà ở dị dạng (nhà siêu mỏng, siêu nhỏ, siêu méo…). Vấn đề này không chỉ làm phá vỡ cấu trúc cảnh quan đô thị, gây mất an toàn chịu lực và phòng cháy chữa cháy… mà còn cho thấy khoảng trống lớn trong chính sách quản lý đất đai và quy hoạch chi tiết sau mở đường.

Đặt trong bối cảnh Luật Đất đai và các quy định quản lý quy hoạch kiến trúc tại Hà Nội, đang từng bước được đổi mới - việc nghiên cứu kinh nghiệm quốc tế về xử lý đất dư thừa (residual parcels) và đề xuất khung giải pháp tích hợp giữa chính sách pháp lý - thiết kế đô thị là yêu cầu mang tính cấp thiết cả về mặt lý luận lẫn thực tiễn.

2. THỰC TRẠNG VÀ BẢN CHẤT CỦA MẢNH ĐẤT DƯ THỪA TẠI HÀ NỘI

2.1. Nguồn gốc hình thành

Có thể thấy, tại Hà Nội, các mảnh đất siêu nhỏ, méo mó sau mở đường, được hình thành chủ yếu do ba nguyên nhân:

+ Phương pháp giải phóng mặt bằng theo ranh giới dự án cứng: nhà nước chỉ đền bù và thu hồi phần diện tích thuộc chỉ giới đường đỏ; phần diện tích còn lại nằm ngoài ranh giới dự án (dù không đủ điều kiện xây dựng) vẫn thuộc quyền sử dụng đất của người dân.

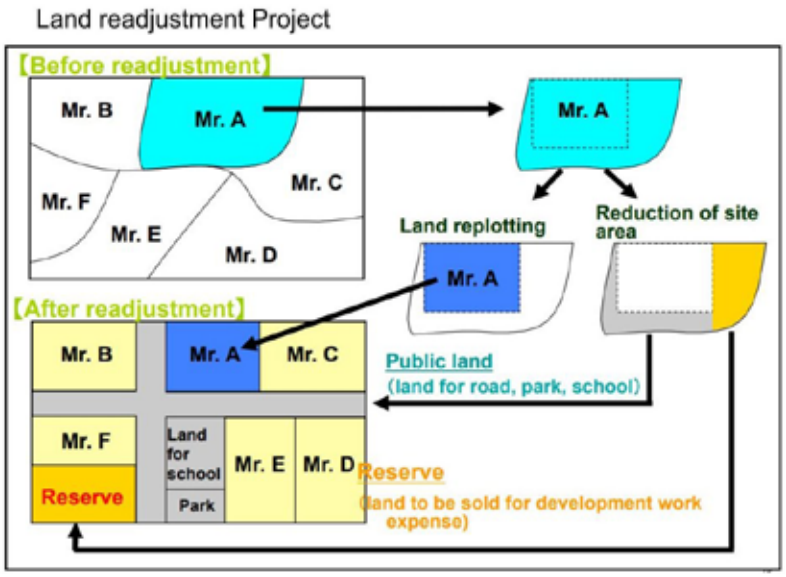
+ Hình thái ô thửa phức tạp của đô thị lịch sử: cấu trúc làng xã nội đô và khu dân cư tự phát tạo ra hệ thống các thửa đất lệch góc đa dạng. Khi đường mới mở, đâm chéo qua ô đất, các phần diện tích thừa bị xắt lát thành nhiều góc nhọn.

+ Giá trị kinh tế của đất mặt tiền lớn: chênh lệch địa tầng giá đất giữa trong ngõ và ngoài mặt lộ giới tạo động lực kinh tế khiến người dân cố bám trụ trên các mảnh đất dư thừa thay vì nhượng lại.

2.2. Nhận diện các bất cập đô thị

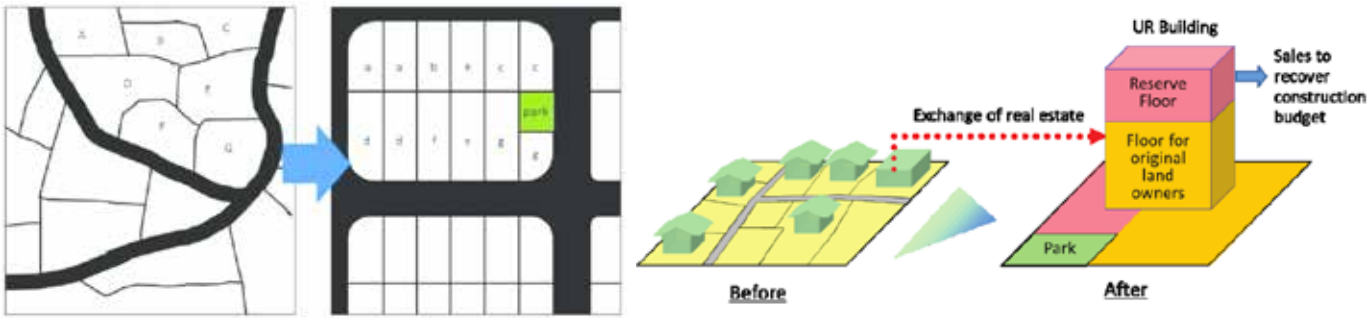
Hệ quả sau mở đường, với những ô đất dị dạng, cả đủ diện tích lẫn không đủ, để trống hoặc xây dựng lại, đều đưa lại cảnh quan đô thị hết sức nhếch nhác, lộn xộn, có thể thấy rõ những bất cập sau:

(*) *Nghiên cứu viên cao cấp, Viện Kiến trúc Quốc gia (Bộ Xây dựng)*



Hình 1. Cơ chế điều chỉnh đất đai (Land Readjustment) tại Nhật Bản và Hàn Quốc.

Giải thích sơ đồ qua các giai đoạn:
1. Trước khi điều chỉnh (Before): các lô đất của người dân có hình dáng méo mó, lộn xộn và không có lối vào rõ ràng. Hệ thống giao thông chỉ là các lối đi nhỏ hẹp, thiếu không gian công cộng (công viên, trường học...).
2. Quá trình thực hiện: Góp đất chung: mỗi chủ hộ cắt lại một phần diện tích nhỏ (ví dụ từ lô đất của ông A, B, C...). Dành đất cho hạ tầng: phần đất đóng góp này được gom lại để chính quyền xây dựng đường sá rộng rãi, vỉa hè, công viên...
Quỹ đất dự phòng (Reserve): một phần đất nhỏ được giữ lại để bán lấy kinh phí bù đắp chi phí xây dựng hạ tầng, giúp chính quyền không bị áp lực ngân sách.
3. Sau khi điều chỉnh (After): các lô đất mới được đo đạc và phân chia lại vuông vắn. Dù diện tích đất của ông A hay ông B có nhỏ hơn ban đầu, nhưng tất cả các khu đất đều vuông vắn, có mặt tiền đường lớn và giá trị kinh tế tăng vọt.



Hình 2. Việc quy hoạch không chỉ tuyến đường mà cả ô phố, làm tăng giá trị của các lô đất, mặc dù diện tích bị giảm. Tạo quỹ đất thỏa mãn giao thông, không gian và tiện ích công cộng.

+ Cảnh quan kiến trúc biến dạng: các công trình dân sinh siêu mỏng, siêu méo với chiều sâu chỉ từ 0,8 - 1,5 m nhưng vươn cao tới 3 - 5 tầng, tạo nên hình ảnh nhếch nhác, chắp vá dọc các tuyến đường mới nâng cấp (ví dụ: đường vành đai 1, vành đai 2, tuyến đường Trường Chinh, Ô Chợ Dừa - Hoàng Cầu…).

+ Rủi ro kết cấu và vận hành: rất nhiều công trình không đảm bảo khả năng chịu lực trước tải trọng gió, rủi ro sụp đổ khi có động đất hoặc hỏa hoạn do thiếu lối thoát hiểm chuẩn hóa.

+ Xung đột pháp lý: quá trình thương lượng nhập thửa đất giữa chủ đất phía trước và chủ đất phía sau thường thất bại do không thống nhất được giá chuyển nhượng, dẫn đến tình trạng tranh chấp hoặc khiếu kiện kéo dài.

3. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VỀ QUẢN LÝ VÀ CHUYỂN ĐỔI ĐẤT DƯ THỪA

Hiện tượng đất dư thừa (residual land) sau khi cải tạo hạ tầng, đặc biệt là hạ tầng giao thông, không phải là đặc thù riêng của Việt Nam mà đã từng xuất hiện phổ biến tại châu Âu và châu Á.

3.1. Nhóm cơ chế pháp lý và quản lý đất đai

Tại Nhật Bản và Hàn Quốc - Cơ chế điều chỉnh đất đai (Land Readjustment):

Tại các quốc gia này, thay vì thu hồi dứt điểm theo vạch làm đường (chỉ giới đường đỏ), chính quyền khoanh vùng toàn bộ ô phố ảnh hưởng. Tất cả chủ đất trong khu vực quy hoạch cùng đóng góp một tỷ lệ diện tích đất nhất định (thường từ 10 - 30%) để làm đường và công trình hạ tầng. Sau khi hoàn thành hạ tầng, chính quyền phân chia lại các lô đất tái định cư vuông vắn, đủ chuẩn xây dựng cho các chủ hộ. Mặc dù diện tích đất của mỗi hộ có thể giảm đi, nhưng giá trị đất đai tăng mạnh nhờ hạ tầng đồng bộ. Cơ chế điều chỉnh đất đai là phương pháp phát triển đô thị thông minh giúp nâng cấp hạ tầng mà không cần thu hồi toàn bộ đất của người dân.

Lợi ích nổi bật của cơ chế và giải pháp này là tăng giá trị tài sản, với diện tích đất nhỏ hơn nhưng giá trị kinh tế và giá bán lại cao hơn nhiều lần nhờ hạ tầng đồng bộ; Giảm chi phí nhà nước khi chính quyền không phải tốn ngân sách lớn để đền bù GPMB hoàn toàn; Đảm bảo công bằng cho người dân khi không bị đẩy đi nơi khác mà được tái định cư tại chỗ với

Bảng 1. So sánh kết quả thực tế sau mở đường tại Anh và Pháp với cơ chế Thu hồi mở rộng (Excess Condemnation)

Tiêu chí	Khi KHÔNG áp dụng	Khi ÁP DỤNG (Pháp, Anh)
Cảnh quan	Xuất hiện nhà "bao diêm", siêu mỏng gồ ghề.	Mặt phố vuông vắn, vỉa hè thông thoáng.
An toàn	Nhà quá mỏng dễ đổ sập, không đủ kết cấu.	Công trình liền kề đạt chuẩn xây dựng.
Quỹ đất thừa	Bị bỏ hoang, tranh chấp hoặc lấn chiếm.	Đưa vào công ích hoặc tạo nguồn thu ngân sách.

Bảng 2. khung giải pháp xử lý đất dư thừa sau mở đường tại Hà Nội

KHUNG GIẢI PHÁP XỬ LÝ ĐẤT DƯ THỪA SAU MỞ ĐƯỜNG TẠI HÀ NỘI

CẤP ĐỘ PHÁP LÝ VÀ THỂ CHẾ
- Quy định chuẩn hình học
- Ngừng cấp phép xây dựng
- Tháo dỡ công trình vi phạm

CẤP ĐỘ QUY HOẠCH VÀ CƠ CHẾ SỬ DỤNG ĐẤT
- Thu hồi mở rộng
- Hợp khối bắt buộc
- Thí điểm gom đất

CẤP ĐỘ THIẾT KẾ VÀ CHUYỂN ĐỔI CHỨC NĂNG SỬ DỤNG ĐẤT
- Công viên bỏ túi Pocket Parks/cây xanh
- Ngầm hóa hạ tầng
- Ki ốt dịch vụ tiện ích đa chức năng...

Bảng 3. Chuyển đổi linh hoạt theo vị trí và chức năng sử dụng của thửa đất công theo thứ tự ưu tiên

TT	Chức năng chuyển đổi	Quy mô diện tích phù hợp	Mức độ ưu tiên áp dụng tại Hà Nội
1	**Công viên bỏ túi (Pocket Park) và thảm xanh...**	10–30m²	**Rất cao** (đặc biệt tại khu vực lõi lịch sử thiếu không gian mở)
2	**Trạm hạ tầng kỹ thuật ngầm, Tủ điện...**	5–15m²	**Cao** (giúp giải phóng không gian di chuyển trên vỉa hè)
3	**Bãi đỗ xe đạp công cộng / Trạm sạc xe điện...**	15–30m²	**Trung bình - Cao** (phù hợp trục đường giao thông huyết mạch)
4	**Ki-ốt dịch vụ văn minh (ATM, Cà phê take-away...**	10–20m²	**Trung bình** (chỉ áp dụng tại các nút giao có lưu lượng đi bộ lớn)

môi trường sống tốt hơn; Đô thị đồng bộ với việc tránh được tình trạng nhà méo mó, ngõ hẻm chật hẹp sau khi mở đường.

Dưới đây là sơ đồ trực quan minh họa cách thức hoạt động của cơ chế điều chỉnh đất đai (Land Readjustment) (Hình 1)

Tại châu Âu (Pháp, Anh) - Cơ chế thu hồi mở rộng (Excess Condemnation):

Quy định pháp lý cho phép cơ quan nhà nước thu hồi toàn bộ thửa đất nếu phần còn lại sau GPMB nằm dưới ngưỡng diện tích tối thiểu được cấp phép xây dựng. Phần đất dư thừa sau thu hồi được đưa vào quỹ đất công để chính quyền đấu giá cho chủ liền kề hoặc chuyển đổi chức năng công cộng. Ngoài ra, còn áp dụng Quy chuẩn xây dựng tối thiểu bắt buộc với nhiều đô thị như không cấp phép xây dựng mới cho các lô đất có diện tích <30-40 m², chiều rộng mặt tiền <3 m hoặc có chiều sâu <4 m. Nếu vi phạm, công trình tồn tại sẽ bị cưỡng chế tháo dỡ. (Hình 2)

Cơ chế này đã đưa lại những lợi ích cốt lõi, bao gồm: về đô thị, tránh xuất hiện nhà siêu mỏng, siêu méo gây mất mỹ quan và mất an toàn; Về kinh tế, tăng nguồn thu ngân sách từ việc đấu giá đất dư thừa; Về xã hội, đảm bảo sự công bằng, tối ưu hóa giá trị sử dụng đất cho cộng đồng. Để thấy rõ sự khác biệt giữa việc có và không có cơ chế này, có thể thấy qua bảng so sánh kết quả thực tế sau: (Bảng 1)

3.2. Nhóm giải pháp thiết kế và tích hợp không gian

Tại một số quốc gia ở châu Âu và châu Á, trong trường hợp mảnh đất dư thừa thuộc sở hữu công hoặc không thể hợp khối, các đô thị phát triển chuyển hướng sang mô hình thiết kế đa năng, bố trí và sử dụng cho các tiện ích đô thị, có thể bao gồm: (Hình 3)

Công viên bỏ túi (Pocket Parks): tận dụng các vệt đất dư thừa rộng 15 - 30 m² để trồng cây xanh, thảm hoa, tạo thành các công viên mini, bố trí ghế nghỉ cho người đi bộ. Toàn bộ tủ điện, trạm biến áp hoặc hạ tầng kỹ thuật được đưa xuống ngầm hoặc tích hợp khéo léo vào kiến trúc cảnh quan. Giải pháp này giúp gia tăng mảng xanh, giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị và cải thiện vi khí hậu tuyến phố. Lợi ích cốt lõi là về mặt xã hội, tạo không gian giao lưu, thư giãn ngắn cho cư dân và người đi bộ; Về thẩm mỹ, xóa bỏ các điểm đen về rác thải hoặc lấn chiếm đất công trái phép; Về kinh tế, tăng giá trị bất động sản cho các khu vực xung quanh nhờ cảnh quan đẹp.

Trạm tiện ích hạ tầng kỹ thuật ngầm hóa: bằng cách đưa các hạ tầng gây mất mỹ quan trên vỉa hè (như trạm biến áp, tủ phân phối điện, tủ thông tin, trạm thu gom rác văn minh) vào bên trong ranh giới mảnh đất dư thừa, trả lại toàn bộ không gian vỉa hè cho người đi bộ. Ví dụ như trạm thu gom rác văn minh ngầm hóa (Underground Waste System) với thiết kế toàn bộ thùng chứa rác dung tích lớn được giấu hoàn toàn dưới lòng đất thông qua hệ thống nâng hạ thủy lực. Trên bề mặt vỉa hè chỉ để lại các họng nạp rác nhỏ gọn, thẩm mỹ, không bốc mùi và không chiếm không gian đi bộ.

Hạ tầng giao thông xanh chia sẻ: chuyển đổi mảnh đất dư thừa thành trạm sạc xe điện, điểm đỗ xe đạp công cộng hoặc điểm dừng chờ xe buýt.

Kiến trúc dịch vụ siêu nhỏ (Micro-architecture): bố trí các ki-ốt thương mại phục vụ đô thị như trạm ATM, quầy bán cà phê mang đi (take-away), nhà vệ sinh công cộng thông minh. Các công trình này chỉ xây dựng 1 tầng, kết cấu nhẹ, đáp ứng nhu cầu tiện ích mà không gây áp lực về mật độ xây dựng.

4. ĐỀ XUẤT KHUNG GIẢI PHÁP TÍCH HỢP CHO THỦ ĐÔ HÀ NỘI

Từ thực tiễn tại Hà Nội và bài học kinh nghiệm quốc tế, đề xuất khung giải pháp với 3 cấp độ nhằm xử lý triệt để bài toán đất dư thừa sau GPMB và mở đường tại khu vực nội đô Hà Nội như sau: (Bảng 2)

4.1. Cấp độ pháp lý và thể chế

Bổ sung Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch: Quy định rõ ngưỡng hình học thửa đất không được phép xây

Hình 3. Giải pháp thiết kế và chuyển đổi linh hoạt chức năng sử dụng đất dư thừa sau mở đường thành không gian công cộng gắn với các tiện ích đô thị.

Hình 4. Các cấp độ xử lý đất dư thừa sau GPMB để mở đường trong nội đô Hà Nội: chuyển nhượng và hợp khối; bố trí linh hoạt các tiện ích công cộng đô thị...

dựng độc lập trên địa bàn Hà Nội: thửa đất có diện tích <15 m^2, hoặc chiều sâu/chiều rộng <3 m, hoặc có góc nhọn <300, tuyệt đối không được cấp phép xây dựng nhà ở mới.

Luật hóa cơ chế "Thu hồi toàn bộ" đối với dự án giao thông: Khi phê duyệt dự án mở đường, ranh giới GPMB phải bao gồm cả các thửa đất bị cắt xén mà phần còn lại không đủ tiêu chuẩn xây dựng. Chi phí bồi thường cho phần đất dư thừa này cần được tính trực tiếp vào tổng mức đầu tư của dự án.

4.2. Cấp độ quy hoạch và cơ chế đất đai

Cơ chế hợp khối bắt buộc và đấu giá: Trong thời hạn từ 30 - 45 ngày kể từ khi thu hồi, chủ thửa đất dư thừa được ưu tiên thỏa thuận chuyển nhượng cho hộ dân liền kề phía sau để hợp nhất lô đất. Nếu không đạt thỏa thuận, Nhà nước thu hồi phần đất dư thừa theo giá bồi thường dự án, sau đó tổ chức đấu giá công khai cho các hộ liền kề xung quanh với điều kiện phải hợp khối sau khi trúng đấu giá.

Thí điểm mô hình Điều chỉnh đất đai (Land Readjustment): Đối với các dự án mở đường lớn qua khu dân cư mật độ cao, Hà Nội cần chuyển từ phương thức "Giải phóng mặt bằng tuyến" sang "Quy hoạch tái thiết ô phố". Người dân đóng góp đất làm đường và nhận lại lô đất tái định cư theo tiêu chuẩn tại chỗ.

4.3. Cấp độ thiết kế đô thị và chuyển đổi chức năng linh hoạt

Đối với các thửa đất dư thừa được chuyển thành đất công sau khi thu hồi, đề xuất danh mục chuyển đổi linh hoạt theo vị trí và chức năng sử dụng của thửa đất theo thứ tự ưu tiên và qua các ví dụ minh họa thực tế như sau: (Bảng 3 và Hình 4). Đây cũng chính là những bước đi ban đầu nhằm thỏa mãn sự thiếu hụt trầm trọng không gian công cộng dành cho các tiện ích đô thị. Đồng thời, các tiện ích này góp phần dần hướng tới tích hợp với mô hình TOD (Transit-Oriented Development - Phát triển theo định hướng giao thông công cộng) và tổ chức theo mô hình POD (Pedestrian-Oriented Development - Phát triển theo định hướng cho người đi bộ).

5. KẾT LUẬN

Hiện tượng đất dư thừa méo mó, siêu nhỏ sau GPMB mở đường là bài toán quản lý phức tạp nhưng hoàn toàn có thể giải quyết nếu có sự thay đổi căn bản về tư duy quy hoạch. Thay vì coi đất dư thừa là "phế phẩm", gây gánh nặng cho quản lý và mỹ quan đô thị - Hà Nội cần xem đây là tài nguyên không gian tiềm năng để bổ sung hệ thống mảng xanh, hạ tầng kỹ thuật và các tiện ích công cộng đang rất thiếu hụt trong lõi đô thị.

Sự phối hợp đồng bộ giữa khung pháp lý nghiêm ngặt (ngăn chặn xây dựng dị dạng), cơ chế tài chính - đất đai linh hoạt (hợp khối, thu hồi mở rộng) và tư duy thiết kế đô thị vị nhân sinh (chuyển đổi thành không gian tiện ích) sẽ là chìa khóa để xử lý dứt điểm bài toán "nhà siêu mỏng, siêu nhỏ, siêu méo", trả lại diện mạo đô thị văn minh và bền vững cho Thủ đô Hà Nội.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. Bộ Xây dựng (2021). QCVN 01:2021/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Quy hoạch xây dựng. NXB Xây dựng, Hà Nội.

2. UBND TP Hà Nội (2022). Quyết định số 28/2022/QĐ-UBND quy định về quản lý và sử dụng đất đai, cấp phép xây dựng trên địa bàn TP Hà Nội.

3. Sorensen, A. (2002). The Making of Urban Japan: Cities and Planning from Edo to the Twenty-first Century. Routledge, London.

4. Doebele, W. A. (1982). Land Readjustment: A Different Approach to Financing Urbanization. Lexington Books.

5. Nordahl, D. (2009). Making People-Friendly Towns: Improving Public Spaces for Healthy Communities. Island Press.

6. Nguyễn Tất Thắng "Xây dựng và phát triển đô thị thông minh - Góc nhìn từ thiết chế xã hội và văn hóa đô thị tại Việt Nam" - Tạp chí Xây dựng (Bộ Xây dựng), số 5/2022.

7. Nguyễn Tất Thắng "Nghệ thuật tổ chức không gian công cộng và không gian sáng tạo - Xu thế phát triển và tái thiết đô thị theo hướng thông minh và lưu giữ bản sắc văn hóa" - Tạp chí Kiến trúc (Hội KTS Việt Nam), số 06/2022.

Tháo gỡ "điểm nghẽn" trong cải tạo, tái thiết khu chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội

> GS.TS.KTS ĐỖ HẬU; TS.KTS NGÔ VIỆT HÙNG

Sau nhiều thập niên sử dụng, sự xuống cấp của các khu chung cư cũ ở Hà Nội, sự quá tải của hạ tầng cùng với sự biến đổi dân số, thay đổi nhu cầu sống và sự gia tăng giá trị đất đai đã đặt các khu chung cư cũ trước yêu cầu phải chuyển đổi.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Trải qua nhiều giai đoạn, từ các khu tập thể quy mô nhỏ, chủ yếu là nhà 2 tầng đến các khu nhà ở 4 hoặc 5 tầng và đến những năm gần đây là các khu đô thị mới hiện đại, nhà cao tầng. Mô hình chung cư Hà Nội đã có sự chuyển biến sâu sắc về quy mô, hình thái kiến trúc, cấu trúc không gian, mô hình sở hữu, phương thức đầu tư và chất lượng môi trường sống. Các khu tập thể được xây dựng trong thế kỷ 20 đã đóng góp quan trọng vào quá trình hiện đại hóa Hà Nội, cung cấp nhà ở cho hàng vạn người dân và hình thành những cấu trúc cộng đồng đô thị có giá trị. Tuy nhiên, sau nhiều thập niên, sự xuống cấp của công trình, sự quá tải của hạ tầng, biến đổi dân số, thay đổi nhu cầu sống và sự gia tăng giá trị đất đai đã đặt các khu chung cư cũ trước yêu cầu chuyển đổi. Cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ đã xuống cấp, nguy hiểm là nhiệm vụ quan trọng, cấp bách, nhằm đảm bảo sự an toàn, tính mạng và tài sản, ổn định đời sống nhân dân, là công tác an sinh xã hội của TP Hà Nội.

Luật Nhà ở, Luật Thủ đô và nhiều Nghị định đã được ban hành trong thời gian qua nhằm tháo gỡ những vướng mắc, khó khăn trong công tác cải tạo, tái thiết các khu chung cư cũ. Chính quyền TP Hà Nội đã ban hành nhiều Nghị quyết, quyết định về chính sách cải tạo, chỉnh trang, tái thiết đô thị, triển khai nhiều kế hoạch cải tạo, tái thiết một số khu chung cư cũ trong những năm vừa qua, tuy nhiên công tác triển khai còn rất chậm không thực hiện đúng theo kế hoạch đề ra. Bài viết này xin nêu một số "điểm nghẽn" trong công tác cải tạo, tái thiết các khu chung cư cũ ở Hà Nội và đề xuất một số định hướng nhằm tháo gỡ những khó khăn, vướng mắc trong công tác cải tạo, tái thiết khu chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội thời gian tới.

THỰC TRẠNG CÁC KHU CHUNG CƯ CŨ TẠI TP HÀ NỘI

Theo thống kê của Sở Xây dựng Hà Nội (năm 2020), trên địa bàn Thành phố có khoảng 1.579 nhà chung cư (bao gồm khoảng 1.273 nhà thuộc 76 khu chung cư và khoảng 306 chung cư cũ độc lập, đơn lẻ) chủ yếu được xây dựng khoảng từ trước năm 1954 và từ năm 1960 - 1994, tập trung chủ yếu tại các quận nội thành và nội đô lịch sử. Trong giai đoạn 1960 - 1970, các chung cư chủ yếu cao từ 2 - 4 tầng, kết cấu tường gạch chịu lực, thi công bằng phương pháp thủ công; giai đoạn 1970 - 1980 xuất hiện nhà kết cấu bê tông lắp ghép có chiều cao tối đa là 5 tầng; giai đoạn 1980 - 1994 có thêm loại hình kết cấu khung bê tông cốt thép chịu lực, chiều cao tối đa 6 tầng; đa phần các khu chung cư đã xuống cấp; phần lớn các công trình hạ tầng kỹ thuật, hạ tầng xã hội trong các khu chung cư đã cũ, xuống cấp, không đáp ứng được nhu cầu sử dụng và quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành.

Trong các khu chung cư cũ, xen kẽ còn có các công trình nhà ở thấp tầng (có trường hợp đã được cấp giấy chứng nhận quyền sử dụng đất), công trình trụ sở cơ quan, văn phòng, dịch vụ thương mại, công trình hạ tầng xã hội (trường học, cơ sở y tế...) và các công trình khác; đa phần các hộ dân tại tầng 1 tự ý xây dựng nhà trên phần đất lưu không; Diện tích căn hộ [1] tại các nhà chung cư cũ phần lớn nhỏ dưới 30 m^2 không thỏa mãn diện tích ở của người dân, đến nay các nhà chung cư cũ này không đáp ứng được tình trạng gia tăng dân số (trước đây mỗi căn hộ chỉ đáp ứng được nhu cầu cho một hộ gia đình 2 đến 3 người, nay nhiều căn hộ có nhiều thế hệ sinh sống) dẫn đến tình trạng cơi nới tự phát, hư hại kết cấu công trình và hạ tầng kỹ thuật, hình thức kiến trúc cảnh quan bên ngoài bị phá vỡ.

Hiện trạng hạ tầng kỹ thuật, hạ tầng xã hội cũng bị xuống cấp không đáp ứng nhu cầu sử dụng của người dân. Tại nhiều khu chung cư, hệ thống đường giao thông trong một số khu vực đã bị hư hỏng, bị lấn chiếm; phần lớn vỉa hè tại các đường nội bộ bị lấn chiếm để sử dụng vào mục đích cá nhân. Tình trạng ngập úng cục bộ khi mưa trên 50 mm/h tại một số khu tập thể (Nam Đồng, Kim Liên, Tân Mai, Thành Công, Nguyễn Công Trứ). Tỷ lệ cây xanh thấp (khoảng 0,6 m^2/người), không đảm bảo quy định QCVN 01:2021/BXD (tối thiểu phải đạt 2 m^2/người); tại một số khu tập thể không có diện tích đất cây xanh tập trung.

- Nhiều không gian công cộng bị lấn chiếm để sử dụng mục đích kinh doanh của các hộ gia đình, thiếu các không gian nghỉ ngơi cho cư dân, thiếu sân chơi cho trẻ em, thiếu bãi đỗ xe…

- Về vệ sinh môi trường: nhiều khu chung cư không có hệ

[1] *Tổng hợp kết quả khảo sát hiện trạng và điều tra xã hội học trong quá trình nghiên cứu lập quy hoạch chi tiết 19 khu chung cư cũ trên địa bàn Thành phố.*

thống thu gom, tập kết và xử lý chất thải rắn; rác thải được các công ty vệ sinh môi trường thu gom hàng ngày theo giờ cố định và vận chuyển đi bằng xe chuyên dụng.

NHỮNG ĐIỂM NGHẼN TRONG CÔNG TÁC CẢI TẠO, TÁI THIẾT KHU CHUNG CƯ CŨ HIỆN NAY

Để triển khai một dự án tái thiết đô thị, một số điểm nghẽn chính thường gặp phải như sau:

Cách tiếp cận cải tạo, tái thiết khu chung cư cũ

Một trong những điểm nghẽn căn bản là cách tiếp cận cải tạo chung cư cũ đôi khi vẫn thiên về "cải tạo công trình" hơn là "tái thiết khu đô thị". Nếu chỉ tập trung vào việc phá dỡ nhà cũ và xây dựng nhà cao tầng mới, dự án có thể giải quyết vấn đề an toàn công trình nhưng chưa chắc giải quyết được những vấn đề lớn hơn như: quá tải dân số, thiếu trường học, nhà trẻ, thiếu không gian công cộng, thiếu cây xanh, thiếu bãi đỗ xe, ùn tắc giao thông, hạ tầng kỹ thuật quá tải, suy giảm chất lượng môi trường, thiếu sự kết nối giữa các khu vực, mất hoặc suy giảm bản sắc kiến trúc - cảnh quan… Do đó, tái thiết chung cư Hà Nội cần được nhìn nhận ở quy mô khu ở - đơn vị ở - ô phố - khu vực đô thị thay vì chỉ ở quy mô từng tòa nhà. Thực tế nghiên cứu quy hoạch Thành Công, Giảng Võ và Ngọc Khánh cho thấy thành phố đã yêu cầu nghiên cứu đồng bộ giao thông, không gian xanh, không gian ngầm, công trình cao tầng, thương mại - dịch vụ và các khu vực TOD. Điều này cho thấy yêu cầu tái thiết đang chuyển dần từ cách tiếp cận "thay nhà cũ" sang tái cấu trúc không gian đô thị.

Điểm nghẽn về quy hoạch

Thực trạng cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ trên địa bàn Thành phố còn gặp nhiều khó khăn do đặc điểm đa dạng về quy mô, vị trí và hiện trạng sử dụng đất. Có thể phân thành 3 loại hình: khu chung cư cũ quy mô trên 2 ha; nhóm chung cư cũ quy mô dưới 2 ha; và các chung cư cũ độc lập, đơn lẻ có diện tích đất hạn chế. Phần lớn các chung cư này nằm tại khu vực nội thành và nội đô lịch sử, nơi bị hạn chế phát triển tầng cao và phải thực hiện từng bước giảm dân số từ 1,2 triệu xuống 0,8 triệu người theo Quy hoạch chung xây dựng Thủ đô. Điều này gây khó khăn cho việc bảo đảm tái định cư tại chỗ 100% và hạn chế khả năng phát triển diện tích kinh doanh để cân đối hiệu quả đầu tư. Đặc biệt, nhiều chung cư đơn lẻ đã hết niên hạn sử dụng, xuống cấp, nguy hiểm (cấp B, C và cận D), trong khi diện tích đất chỉ khoảng 500 - 700 m^2, không đủ điều kiện xây dựng nhà tái định cư và khó tự cân đối tài chính dự án.

Bên cạnh đó, trong phạm vi quy hoạch còn tồn tại nhà ở thấp tầng đã được cấp Giấy chứng nhận quyền sử dụng đất và đất trụ sở cơ quan, doanh nghiệp. Việc thiếu cơ chế cụ thể về bồi thường, hỗ trợ và tái định cư khiến việc đạt được sự đồng thuận của các tổ chức, cá nhân liên quan gặp nhiều khó khăn.

Trình tự lựa chọn nhà đầu tư, lập và phê duyệt quy hoạch chi tiết tỷ lệ 1/500, cơ chế quy gom các chung cư đơn lẻ và vai trò của Nhà nước trong tổ chức lập quy hoạch cũng gặp phải một số khó khăn theo quy định của pháp luật hiện hành. Việc lựa chọn nhà đầu tư trước khi có quy hoạch chi tiết khiến khó xác định các chỉ tiêu quy hoạch, phương án bồi thường và hiệu quả đầu tư. Đồng thời, pháp luật chưa quy định đầy đủ cơ chế quy gom, tái thiết các chung cư nhỏ lẻ và việc tổ chức lập quy hoạch khi chưa xác định chủ đầu tư, làm giảm tính khả thi và sức hấp dẫn của các dự án.

Quy hoạch là một trong những khâu quyết định khả năng triển khai dự án. Tuy nhiên, đối với nhiều khu chung cư cũ, việc xác định ranh giới tái thiết, chỉ tiêu dân số, tầng cao, mật độ xây dựng, hệ số sử dụng đất, hệ thống giao thông và quỹ đất công cộng thường phức tạp. Một khu chung cư cũ có thể hình thành từ nhiều giai đoạn, nhiều dự án và nhiều loại đất khác nhau. Ranh giới sử dụng đất hiện trạng không phải lúc nào cũng trùng với ranh giới khu vực cần tái thiết. Do đó, nếu chỉ lập quy hoạch trong phạm vi từng tòa nhà sẽ khó giải quyết những vấn đề mang tính khu vực.

Điểm nghẽn về đất đai

Đất đai là một trong những vấn đề phức tạp nhất của cải tạo, tái thiết chung cư cũ. Trong nhiều khu tập thể cũ, cấu trúc sở hữu và sử dụng đất đã thay đổi đáng kể qua thời gian. Có thể tồn tại đồng thời: đất thuộc khuôn viên nhà chung cư, đất công cộng, đất hạ tầng, đất cơ quan, đất thương mại, đất ở của hộ dân, đất sử dụng xen kẹt, phần diện tích sử dụng không đúng ranh giới ban đầu. Điều này khiến việc xác định quỹ đất thực hiện dự án trở nên phức tạp. Bên cạnh đó, tái thiết thường đòi hỏi phạm vi dự án lớn hơn khuôn viên tòa nhà cũ. Khi mở rộng ranh giới dự án sẽ phát sinh vấn đề thu hồi đất, bồi thường, hỗ trợ và tái định cư đối với các chủ thể khác nhau.

Điểm nghẽn về bồi thường, tái định cư và bảo đảm quyền lợi của người dân

Đây là điểm nghẽn có tính chất xã hội đặc biệt quan trọng. Kết quả khảo sát xã hội học của TP Hà Nội tại các khu chung cư cũ (nguồn UBND TP Hà Nội, 2021) cho thấy mức độ đồng thuận của các hộ dân (chủ sở hữu nhà chung cư) đối với chủ trương cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ tương đối cao, với tỷ lệ đồng thuận từ 63 - 95%. Tuy nhiên, sự đồng thuận này đi kèm với yêu cầu tương đối cao về hệ số bồi thường diện tích căn hộ tái định cư tại chỗ (hệ số K). Cụ thể, phần lớn các hộ dân được khảo sát đề nghị hệ số K ở mức $K \geq 1,3$ đến $K \geq 2$. Điều này cho thấy mức độ đồng thuận của người dân đối với chủ trương cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ có mối liên hệ đáng kể với kỳ vọng về quyền lợi diện tích căn hộ sau tái định cư, trong đó hệ số K là một trong những vấn đề được người dân quan tâm hàng đầu. Người dân sống trong chung cư cũ không chỉ là "đối tượng bị di dời", mà là chủ thể của quá trình tái thiết. Họ có quyền lợi về nhà ở, tài sản, vị trí cư trú, sinh kế, quan hệ cộng đồng và tiếp cận hạ tầng đô thị. Một phương án tái thiết nếu chỉ giải quyết được diện tích căn hộ nhưng làm thay đổi đáng kể vị trí cư trú, chi phí sinh hoạt hoặc khả năng tiếp cận trường học, việc làm và dịch vụ đô thị có thể tạo ra sự phản ứng của cộng đồng. Do đó, vấn đề đồng thuận không nên được hiểu đơn giản là "người dân có đồng ý phá dỡ hay không", mà cần mở rộng thành: Người dân có chấp nhận phương án tái thiết tổng thể hay không, và phương án đó có bảo đảm sự công bằng về quyền lợi hay không?

Điểm nghẽn về tài chính

Một dự án cải tạo, tái thiết chung cư cũ thường phải đồng thời thực hiện: việc phá dỡ công trình cũ, xây dựng nhà ở mới, bố trí tái định cư, xây dựng hạ tầng kỹ thuật, xây dựng hạ tầng xã hội, tổ chức giao thông, tạo lập không gian công cộng, bồi thường, bố trí nhà tạm cư…Tổng mức đầu tư để thực hiện dự án đòi hỏi rất lớn và chi phí vốn trong thời gian dài, trong khi đó, khả năng chi trả của người dân có hạn, quỹ đất thương mại để tạo nguồn thu có giới hạn, khả năng huy động nhà đầu tư khó khăn bởi cơ chế

chia sẻ lợi ích không được thống nhất. Do đó, bài toán tài chính có thể được khái quát: Chi phí tái thiết + chi phí GPMB + chi phí tái định cư + chi phí hạ tầng > khả năng tạo doanh thu của dự án. Các cơ chế, chính sách trước đây chưa quy định cụ thể về thu hồi đất, bồi thường, giải phóng mặt bằng và chủ yếu dựa trên cơ chế thỏa thuận giữa các bên. Thực tế tại 19 dự án đã hoàn thành, 14 dự án đang triển khai và qua khảo sát tại 19 khu chung cư cũ cho thấy nhiều chủ sở hữu yêu cầu hệ số bồi thường tái định cư tại chỗ rất cao (K ≥ 2 - 2,5). Việc chưa quy định mức hệ số bồi thường tối đa làm gia tăng khó khăn trong đàm phán giữa nhà đầu tư và người dân, trở thành một trong những nguyên nhân làm chậm tiến độ dự án. Bên cạnh đó, quy định của pháp luật hiện hành chưa quy định đầy đủ hệ số bồi thường đối với diện tích sử dụng chung, nhà ở riêng lẻ, hộ dân tầng 1; cũng như cơ chế bồi thường, tái định cư đối với trụ sở doanh nghiệp, tổ chức, tài sản thuộc sở hữu Nhà nước và các dự án quy gom chung cư cũ độc lập, đơn lẻ. Đây là nguyên nhân khiến việc lựa chọn nhà đầu tư và xác định cơ chế tài chính trở thành khâu then chốt.

Điểm nghẽn về hạ tầng đô thị

Triển khai dự án tái thiết đô thị không chỉ giải quyết nhà ở cho người dân mà phải xây dựng hệ thống hạ tầng kỹ thuật như: hệ thống cấp nước, thoát nước, hệ thống điện, hệ thống giao thông… và hệ thống hạ tầng xã hội như: trường học, nhà trẻ, dịch vụ công cộng, không gian xanh, sân chơi, bãi đỗ xe…

Kết quả rà soát cho thấy hạ tầng kỹ thuật tại phần lớn các khu chung cư cũ đã xuống cấp, thiếu đồng bộ và không đáp ứng đầy đủ các yêu cầu hiện hành. Hệ thống giao thông nội bộ hư hỏng, bị lấn chiếm, mặt cắt nhỏ, phổ biến 3 - 6 m hoặc thấp hơn; vỉa hè bị sử dụng sai mục đích. Hệ thống cấp điện chủ yếu đi nổi, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn và ảnh hưởng mỹ quan; hệ thống cấp nước thiếu đồng bộ, chất lượng thấp. Hệ thống thoát nước xuống cấp, một số nơi dùng chung thoát nước mưa và nước thải, chưa bảo đảm yêu cầu vệ sinh môi trường. Diện tích cây xanh chỉ đạt khoảng 30% mức yêu cầu theo quy chuẩn, nhiều khu thiếu quỹ đất cây xanh tập trung. Hệ thống PCCC chưa được đầu tư đầy đủ; không gian tập kết chất thải và bãi đỗ xe chuyên biệt còn thiếu. Việc tận dụng lòng đường, sân chơi và khoảng trống để đỗ xe tiếp tục gây áp lực lên giao thông và không gian công cộng.

Do đó, dự án tái thiết không thể chỉ tính toán "đủ căn hộ tái định cư", mà phải tính toán hạ tầng đô thị đáp ứng nhu cầu sử dụng của người dân sinh sống trong khu chung cư sau khi đã tái thiết.

Điểm nghẽn cơ chế phối hợp giữa các cơ quan

Tái thiết chung cư cũ liên quan đến rất nhiều lĩnh vực: quy hoạch, xây dựng, đất đai, nhà ở, đầu tư, tài chính, giao thông, môi trường, văn hóa, giải phóng mặt bằng … Mỗi lĩnh vực do một cơ quan quản lý. Nếu mỗi cơ quan giải quyết một phần việc theo trình tự riêng, thời gian thực hiện dự án có thể kéo dài. Đặc biệt, sau khi thực hiện mô hình chính quyền địa phương hai cấp, trách nhiệm triển khai tại địa bàn được phân giao cho UBND xã, phường. Do mới sát nhập, nhiều phường, xã gặp nhiều khó khăn trong việc nắm bắt dữ liệu trên địa bàn mới rộng hơn trước. Việc phối hợp giữa phường, xã và các cơ quan quản lý các lĩnh vực trên địa bàn thành phố gặp khó khăn. Chính quyền thành phố Hà Nội đã có các chỉ đạo cụ thể về việc tổ chức lập quy hoạch, kiểm định và triển khai các nhiệm vụ cải tạo chung cư cũ tại các xã, phường. Điểm nghẽn hiện nay không chỉ là "thiếu quy định", mà còn là: làm thế nào để chuyển quy định thành một quy trình thực hiện liên thông, rõ trách nhiệm và có thời hạn cụ thể.

Điểm nghẽn về dữ liệu và hiện trạng sở hữu

Một dự án tái thiết khu nhà ở cần có hệ thống dữ liệu tương đối đầy đủ về: dân số, hạ tầng, số lượng căn hộ, diện tích căn hộ, chủ sở hữu, người sử dụng, tình trạng pháp lý, nguồn gốc đất, hiện trạng công trình, nhu cầu tái định cư, nhu cầu nhà ở, giá trị đất… Trong thực tế, dữ liệu của các khu chung cư cũ thường được hình thành qua nhiều thời kỳ và có thể nằm ở nhiều cơ quan khác nhau. Vì vậy thời gian khảo sát, đối chiếu, xác nhận, cập nhật dữ liệu có thể kéo dài. Việc Hà Nội tổ chức kiểm định và đánh giá lại chất lượng toàn bộ chung cư cũ trong giai đoạn hiện nay cho thấy Thành phố đang cố gắng xây dựng cơ sở dữ liệu và căn cứ kỹ thuật thống nhất cho quá trình tái thiết đô thị…

ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP CẢI TẠO, TÁI THIẾT CÁC KHU CHUNG CƯ CŨ Ở HÀ NỘI TRONG THỜI GIAN TỚI

Từ thực tiễn trên, công tác cải tạo, tái thiết chung cư cũ ở Hà Nội trong thời gian tới cần được xây dựng trên quan điểm lấy an toàn và chất lượng sống của người dân làm trung tâm, lấy quy hoạch làm cơ sở, lấy hạ tầng làm điều kiện, lấy hiệu quả sử dụng đất làm nguồn lực và lấy sự đồng thuận xã hội làm nền tảng. Một số giải pháp đề xuất:

Hoàn thiện cơ chế quy hoạch

Hoàn thiện cơ chế quy hoạch là một trong những giải pháp có ý nghĩa nền tảng đối với cải tạo, tái thiết các khu chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội. Thực tiễn cho thấy, những khó khăn trong cải tạo chung cư cũ không chỉ xuất phát từ nguồn vốn, giải phóng mặt bằng hay sự đồng thuận của người dân, mà còn liên quan trực tiếp đến phạm vi, nội dung, phương pháp và tính khả thi của quy hoạch. Vì vậy, trong thời gian tới, Hà Nội cần chuyển từ cách tiếp cận quy hoạch nhằm giải quyết từng công trình sang quy hoạch và tái thiết tổng thể khu vực, bảo đảm sự đồng bộ giữa nhà ở, dân số, đất đai, hạ tầng kỹ thuật, hạ tầng xã hội, giao thông, không gian xanh và cảnh quan đô thị. Quy hoạch cần trở thành công cụ xác định trước các điều kiện phát triển của dự án, thay vì để phương án đầu tư quyết định ngược trở lại phương án quy hoạch. Đặc biệt, việc xác định dân số sau tái thiết phải được coi là một nội dung trọng tâm. Không nên sử dụng việc tăng tầng cao, tăng diện tích sàn và tăng dân số như giải pháp mặc định để tạo nguồn lực tài chính cho dự án nếu không đánh giá đầy đủ sức chịu tải của hạ tầng. Chỉ tiêu quy hoạch phải được xác định trên cơ sở sức chịu tải của hệ thống hạ tầng và chất lượng môi trường đô thị, không chỉ dựa trên khả năng khai thác quỹ đất. Quy hoạch tái thiết cần được đặt trong mối quan hệ với hệ thống giao thông công cộng, đặc biệt là mạng lưới đường sắt đô thị và các đầu mối vận tải công cộng. Quy hoạch phải dành đủ quỹ đất cho hạ tầng xã hội và không gian công cộng. Hà Nội cần xây dựng cơ sở dữ liệu thống nhất phục vụ quy hoạch chung cư cũ, tích hợp, ứng dụng dữ liệu số và GIS trong quy hoạch tái thiết.

Quy hoạch lại khu tập thể cũ cần thực hiện một cách bài bản theo các chỉ tiêu quy hoạch dựa trên dân số sau tái thiết, hạn chế việc chất tải thêm dân số vượt quá sức chịu tải của hạ tầng kỹ thuật và hạ tầng xã hội. Có thể sử dụng cơ chế hoán đổi lợi ích cho chủ đầu tư (dành quỹ đất ở ngoại thành để chủ đầu tư phát triển dự án khác) mà không nhất thiết phải tăng tầng cao, tăng diện

tích sàn để tạo nguồn lực tài chính cho chủ đầu tư.

Hoàn thiện cơ chế đất đai

Cơ chế đất đai là một trong những yếu tố có tính quyết định đối với khả năng triển khai cải tạo, tái thiết các khu chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội. Hoàn thiện cơ chế đất đai trong cải tạo, tái thiết chung cư cũ cần hướng tới giải quyết đồng thời ba vấn đề: xác lập rõ quỹ đất tái thiết; khai thác hợp lý giá trị đất đai để tạo nguồn lực; và bảo đảm quyền, lợi ích hợp pháp của người dân trong quá trình chuyển đổi không gian đô thị. Tái thiết chung cư cũ cần được xem là một phương thức tái phân bổ và nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn lực đất đai đô thị. Cần xác định quỹ đất tái thiết theo cấu trúc không gian đô thị, thay vì chỉ theo ranh giới từng tòa nhà, bảo đảm diện tích các không gian ở, không gian công cộng, không gian xanh, hạ tầng đô thị. Có thể kết hợp hoàn thiện cơ chế đất đai, đền bù hoán đổi lợi ích với quỹ đất ở ngoại thành như đã đề cập ở phần quy hoạch để hỗ trợ cho chủ đầu tư đảm bảo nguồn lực.

Đổi mới tư duy về cơ chế tài chính cho cải tạo, tái thiết chung cư cũ

Thay đổi cách tiếp cận trước đây chuyển sang cách tiếp cận "tái thiết đô thị dựa trên tái cấu trúc giá trị đất và huy động tổng hợp các nguồn lực". Theo hướng này, nguồn lực tài chính cho cải tạo, tái thiết không chỉ dựa vào ngân sách nhà nước hoặc vốn của doanh nghiệp, mà cần hình thành một hệ thống tài chính tái thiết đô thị đa nguồn, trong đó giá trị gia tăng của đất đai sau tái thiết được sử dụng hợp lý để bù đắp chi phí đầu tư, hạ tầng, tái định cư và các chi phí xã hội của dự án. Xây dựng cơ chế tài chính cho từng loại dự án, trong đó có thể huy động tài chính của cả chủ đầu tư lẫn tài chính của người dân khi tiến hành tái thiết.

Ngoài ra, cần nghiên cứu cơ chế phân bổ và thu hồi một phần hợp lý giá trị gia tăng từ đất đai để tạo nguồn lực trở lại cho chính quá trình tái thiết.

Huy động sự tham gia của người dân

Có cơ chế người dân tham gia trong quá trình quy hoạch: tham vấn từ giai đoạn quy hoạch, công khai phương án, lựa chọn phương án, bảo đảm quyền tái định cư tại chỗ hoặc gần nơi ở cũ. Người dân cần có tiếng nói nhất định trong việc quyết định lựa chọn phương án quy hoạch, phương án thiết kế kiến trúc, lựa chọn chủ đầu tư hoặc được cơ hội tham gia vào việc huy động tài chính cho dự án.

Có cơ chế lựa chọn chủ đầu tư

Do đặc thù của các dự án tái thiết là quy mô lớn, thời gian thực hiện dài, liên quan đến nhiều chủ thể, có yêu cầu cao về năng lực tài chính, quy hoạch, xây dựng, giải phóng mặt bằng, tái định cư và quản lý vận hành sau đầu tư. Vì vậy, cơ chế lựa chọn nhà đầu tư cần chuyển từ tư duy "lựa chọn doanh nghiệp có khả năng xây dựng công trình" sang "lựa chọn đối tác có năng lực thực hiện toàn bộ quá trình tái thiết đô thị". Nhà đầu tư được lựa chọn không chỉ phải chứng minh khả năng huy động vốn mà còn phải có năng lực: nghiên cứu và đề xuất giải pháp quy hoạch, tổ chức thực hiện dự án trên quy mô khu vực, huy động và quản lý nguồn vốn lớn, thực hiện giải phóng mặt bằng, tái định cư theo quy định, tổ chức xây dựng đồng bộ nhà ở và hạ tầng, phối hợp với chính quyền và cộng đồng dân cư, bảo đảm tiến độ, quản lý chất lượng công trình, vận hành và duy trì chất lượng khu đô thị sau tái thiết. Do đó, lựa chọn nhà đầu tư phải được xem là một cơ chế sàng lọc tổng hợp về năng lực, uy tín, tài chính, kỹ thuật và trách nhiệm xã hội, chứ không chỉ là một thủ tục lựa chọn chủ thể thực hiện dự án. Bên cạnh đó, quá trình lựa chọn nhà đầu tư cần được thực hiện theo một quy trình minh bạch, có trách nhiệm giải trình và chịu trách nhiệm với tổng thể toàn bộ dự án từ lúc lập quy hoạch đến khi vận hành khu đô thị sau cải tạo.

KẾT LUẬN

Cải tạo, tái thiết chung cư Hà Nội cần được nhìn nhận như một quá trình phát triển tiếp nối lịch sử đô thị, chứ không đơn thuần là một chương trình thay thế công trình cũ bằng công trình mới, không còn đơn thuần là xử lý những tòa nhà xuống cấp mà là tái cấu trúc các khu vực đô thị hiện hữu. Mục tiêu cuối cùng là chuyển hóa những khu ở được hình thành trong điều kiện của thế kỷ 20 thành những đơn vị ở phù hợp với yêu cầu về chất lượng sống, hạ tầng, môi trường, cảnh quan, bản sắc và tính bền vững của Hà Nội thế kỷ 21.

Những điểm nghẽn chủ yếu tập trung ở quy hoạch, đất đai, tài chính, giải phóng mặt bằng, tái định cư, lựa chọn nhà đầu tư, hạ tầng, sự đồng thuận của cộng đồng và cơ chế phối hợp quản lý. Từ lịch sử hình thành đó, yêu cầu cấp thiết hiện nay là chuyển từ tư duy "cải tạo từng tòa nhà chung cư" sang tư duy "tái thiết toàn khu và tái cấu trúc không gian đô thị". Đây cũng chính là tiền đề để các khu chung cư có thể trở thành một trong những động lực quan trọng góp phần định hình diện mạo Hà Nội trong thế kỷ 21. Các điểm nghẽn này có quan hệ chặt chẽ với nhau: quy hoạch ảnh hưởng đến tài chính; tài chính ảnh hưởng đến khả năng tái định cư; tái định cư ảnh hưởng đến đồng thuận; đồng thuận ảnh hưởng đến tiến độ; trong khi tất cả lại chịu giới hạn của hạ tầng và sức chịu tải đô thị. Vì vậy, tháo gỡ điểm nghẽn trong cải tạo, tái thiết chung cư Hà Nội cần được tiếp cận như một bài toán quản trị và tái thiết đô thị tổng hợp, thay vì chỉ là bài toán xây dựng nhà ở. Đặc biệt, trong bối cảnh Hà Nội đang tổ chức lại công tác lập quy hoạch, kiểm định và triển khai các dự án chung cư cũ trên phạm vi toàn thành phố, việc xây dựng một mô hình tái thiết đô thị có tính hệ thống, phân loại dự án và phân bổ trách nhiệm rõ ràng có ý nghĩa quyết định đối với khả năng chuyển từ "kế hoạch cải tạo" sang "kết quả tái thiết thực tế". Thực tiễn đó đặt ra yêu cầu cần nhìn nhận cải tạo, tái thiết đô thị không chỉ là một nhiệm vụ quản lý xây dựng mà phải trở thành một chiến lược phát triển đô thị quan trọng của Việt Nam trong giai đoạn mới.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Khánh An, Cải tạo chung cư cũ tại Hà Nội: Hướng giải quyết mới cho vướng mắc cũ, Báo Hà Nội mới, 13/5/2025

2. Quốc hội, Luật Thủ đô số 02/2026/QH16

3. Sở Xây dựng, Báo cáo tổng kết 5 năm triển khai đề án cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội ban hành kèm theo Quyết định số 5289/QĐ-UBND ngày 18/12/2021 của UBND TP Hà Nội.

4. Nguyễn Thành Sơn & Trần Huy Ánh, Một số yếu tố tham gia cấu thành TOC cho quy hoạch Hà Nội, Tạp chí Kiến trúc, 06/2025.

5. UBND TP Hà Nội, 2021, Quyết định về việc ban hành "Đề án cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội". số 5289/QĐ-UBND

6. UBND TP Hà Nội, 2026, Nghị quyết 66/2026/NQ-HĐND của HĐND TP Hà Nội quy định chính sách cải tạo, chỉnh trang, tái thiết đô thị và phát triển đô thị theo định hướng giao thông (TOD) trên địa bàn Thủ đô.

Đài phun nước thông minh trong kiến tạo bản sắc và phát triển không gian công cộng tại Thủ đô Hà Nội

PGS.TS VŨ THỊ VINH*

Trong bối cảnh chuyển đổi số và phát triển đô thị thông minh, các công trình cảnh quan tích hợp công nghệ hiện đại ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao chất lượng không gian công cộng và gia tăng sức hấp dẫn đô thị.

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh chuyển đổi số và xây dựng đô thị thông minh đang được triển khai mạnh mẽ, các công trình cảnh quan tích hợp công nghệ hiện đại ngày càng giữ vai trò quan trọng trong việc nâng cao chất lượng không gian công cộng, gia tăng sức hấp dẫn đô thị và phục vụ đời sống văn hóa cộng đồng. Trong số đó, đài phun nước thông minh là một mô hình tiêu biểu, kết hợp công nghệ điều khiển tự động, hệ thống cảm biến, Internet vạn vật (IoT), âm thanh, ánh sáng và nghệ thuật trình diễn nhằm tạo nên những không gian tương tác hiện đại, góp phần phát triển du lịch, kinh tế đêm và quảng bá hình ảnh đô thị.

Đối với Thủ đô Hà Nội - thành phố hơn một nghìn năm văn hiến, trung tâm chính trị, văn hóa của cả nước và là Thành phố sáng tạo được UNESCO ghi danh - việc phát triển các không gian công cộng chất lượng cao gắn với bảo tồn và phát huy bản sắc văn hóa đang trở thành yêu cầu quan trọng trong quá trình phát triển đô thị hiện đại. Trong bối cảnh đó, đài phun nước thông minh không chỉ có giá trị về cảnh quan và công nghệ mà còn là phương tiện truyền tải các giá trị lịch sử, văn hóa Thăng Long - Hà Nội thông qua ngôn ngữ của nước, ánh sáng và nghệ thuật trình diễn.

KHÁI NIỆM VÀ ĐẶC TRƯNG CỦA ĐÀI PHUN NƯỚC THÔNG MINH [10] [14]

Khái niệm đài phun nước thông minh

Đài phun nước thông minh là hệ thống công trình cảnh quan sử dụng nước làm yếu tố trung tâm, được tích hợp các công nghệ điều khiển tự động, công nghệ số, cảm biến, kết nối dữ liệu và các giải pháp quản lý thông minh nhằm tối ưu hóa quá trình vận hành, tiết kiệm tài nguyên, nâng cao hiệu quả sử dụng và tạo ra các trải nghiệm đa giác quan cho cộng đồng.

Khác với đài phun nước truyền thống chủ yếu phục vụ mục đích trang trí và vận hành theo các chế độ cố định, đài phun nước thông minh có khả năng điều chỉnh linh hoạt các kịch bản hoạt động thông qua hệ thống điều khiển số. Các yếu tố như chiều cao cột nước, áp lực dòng chảy, màu sắc ánh sáng, âm thanh và thời gian hoạt động có thể được lập trình hoặc điều khiển từ xa phù hợp với từng sự kiện và từng không gian cụ thể.

Trong xu thế xây dựng đô thị thông minh, đài phun nước thông minh không chỉ là một công trình hạ tầng cảnh quan mà còn là một thành phần của hệ sinh thái đô thị số, góp phần nâng cao chất lượng môi trường sống, gia tăng giá trị thẩm mỹ và tạo lập các không gian công cộng hấp dẫn. Cần phân biệt đài phun nước thông minh với các công trình nhạc nước thông thường. Nếu nhạc nước chủ yếu phục vụ biểu diễn nghệ thuật thì đài phun nước thông minh còn tích hợp các công nghệ quản lý, giám sát, tiết kiệm tài nguyên và kết nối với hệ thống đô thị thông minh.

Các thành phần công nghệ chủ yếu

Đài phun nước thông minh thường được cấu thành bởi bốn nhóm công nghệ cơ bản.

Thứ nhất, hệ thống điều khiển tự động và điều khiển lập trình, đóng vai trò trung tâm trong việc kiểm soát hoạt động của bơm, vòi phun, hệ thống chiếu sáng và các thiết bị phụ trợ theo những kịch bản được thiết lập sẵn.

Thứ hai, hệ thống cảm biến và Internet vạn vật (IoT), cho phép giám sát lưu lượng nước, chất lượng nước, mức tiêu thụ năng lượng và trạng thái thiết bị theo thời gian thực, từ đó nâng cao hiệu quả quản lý và giảm thiểu sự cố vận hành.

Thứ ba, công nghệ trình diễn đa phương tiện, bao gồm hệ thống đèn LED thông minh, công nghệ laser, trình chiếu hình ảnh và đồng bộ âm thanh, tạo nên các chương trình nghệ thuật đặc sắc phục vụ cộng đồng.

Thứ tư, các giải pháp tiết kiệm nước và năng lượng thông qua hệ thống tuần hoàn nước khép kín, công nghệ xử lý nước và các thiết bị hiệu suất cao, góp phần bảo đảm phát triển bền vững.

Những đặc trưng cơ bản của đài phun nước thông minh

So với đài phun nước truyền thống, đài phun nước thông minh có một số đặc trưng nổi bật.

Một là, tính tự động hóa và khả năng quản trị thông minh

(*) *Nguyên Phó hiệu trưởng Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội*

Crown Fountain, Chicago.

Spectra, Singapore.

Benthemplein, Rotterdam.

Madrid Río, Madrid.

thông qua việc tích hợp các công nghệ số và kết nối dữ liệu với hệ thống quản lý đô thị.

Hai là, hiệu quả sử dụng tài nguyên nhờ áp dụng các giải pháp tuần hoàn nước, giám sát tiêu thụ năng lượng và tối ưu hóa vận hành.

Ba là, khả năng tương tác và tạo trải nghiệm cộng đồng thông qua sự kết hợp giữa nước, ánh sáng, âm thanh và nghệ thuật trình diễn, góp phần nâng cao chất lượng không gian công cộng.

Bốn là, khả năng thể hiện bản sắc văn hóa địa phương. Với sự hỗ trợ của công nghệ số, đài phun nước có thể truyền tải những câu chuyện lịch sử, giá trị văn hóa và hình ảnh đặc trưng của từng địa phương thông qua các chương trình nghệ thuật được thiết kế riêng.

Như vậy, đài phun nước thông minh là sự kết hợp hài hòa giữa công nghệ, nghệ thuật, môi trường và văn hóa. Đây là cơ sở để loại hình công trình này ngày càng được quan tâm trong chiến lược phát triển đô thị thông minh, đô thị sáng tạo và đô thị có bản sắc tại nhiều quốc gia trên thế giới cũng như ở Việt Nam.

VAI TRÒ CỦA ĐÀI PHUN NƯỚC THÔNG MINH TRONG KIẾN TẠO BẢN SẮC VÀ SỨC HẤP DẪN ĐÔ THỊ

Tạo điểm nhấn cảnh quan và nâng cao chất lượng không gian công cộng [16]

Trong quá trình phát triển đô thị hiện đại, không gian công cộng ngày càng được coi là một trong những tiêu chí quan trọng phản ánh chất lượng sống và mức độ văn minh của đô thị. Các quảng trường, công viên, tuyến phố đi bộ, khu vực ven hồ và ven sông không chỉ đáp ứng nhu cầu sinh hoạt cộng đồng mà còn góp phần hình thành bản sắc không gian đô thị.

Với khả năng kết hợp giữa yếu tố nước, ánh sáng, âm thanh và nghệ thuật trình diễn, đài phun nước thông minh tạo nên những điểm nhấn cảnh quan có giá trị thẩm mỹ cao, góp phần nâng cao chất lượng không gian công cộng. Khác với các công trình trang trí tĩnh, đài phun nước thông minh có tính động và khả năng thay đổi linh hoạt theo thời gian, tạo sức hấp dẫn đối với người dân và du khách.

Tại nhiều thành phố trên thế giới, các đài phun nước hiện đại đã trở thành trung tâm của các quảng trường, công viên và khu vực sinh hoạt cộng đồng, góp phần hình thành những không gian đô thị sống động, thân thiện và giàu tính tương tác.

Công cụ kể câu chuyện văn hóa và xây dựng thương hiệu đô thị [15]

Một trong những giá trị nổi bật của đài phun nước thông minh là khả năng truyền tải các thông điệp văn hóa thông qua những chương trình nghệ thuật đa phương tiện. Nhờ sự hỗ trợ của công nghệ điều khiển số, hệ thống ánh sáng, âm thanh và trình diễn nước có thể được lập trình để tái hiện các sự kiện lịch sử, biểu tượng văn hóa và những giá trị đặc trưng của từng địa phương.

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và sự phát triển nhanh chóng của công nghệ, nhiều đô thị đang đứng trước nguy cơ mai một bản sắc văn hóa. Vì vậy, việc ứng dụng công nghệ hiện đại để bảo tồn, giới thiệu và lan tỏa các giá trị văn hóa địa phương đang trở thành một xu hướng quan trọng.

Đối với Hà Nội, đài phun nước thông minh có thể trở thành phương tiện kể những câu chuyện về Thăng Long - Hà Nội nghìn năm văn hiến thông qua các chủ đề như truyền thuyết Rồng bay, Hồ Gươm và truyền thuyết trả gươm, Khuê Văn Các và truyền thống hiếu học, Hà Nội bốn mùa hay hình ảnh Thành phố sáng tạo trong thời đại số.

Trong bối cảnh cạnh tranh giữa các thành phố ngày càng gia tăng, bản sắc đô thị được xem là một nguồn lực phát triển quan

trọng. Các công trình biểu tượng không chỉ góp phần tạo dựng hình ảnh nhận diện mà còn nâng cao năng lực cạnh tranh, thu hút đầu tư, khách du lịch và nguồn nhân lực chất lượng cao. Với khả năng kết hợp công nghệ hiện đại và các giá trị văn hóa địa phương, đài phun nước thông minh có thể góp phần hình thành những biểu tượng mới cho Hà Nội trong thế kỷ 21.

Thúc đẩy phát triển du lịch đô thị và kinh tế đêm [16]

Trong những năm gần đây, phát triển kinh tế đêm đã trở thành một định hướng quan trọng của nhiều đô thị lớn trên thế giới. Các hoạt động văn hóa, nghệ thuật và giải trí được tổ chức vào buổi tối không chỉ nâng cao chất lượng cuộc sống mà còn tạo thêm nguồn thu cho ngành du lịch và dịch vụ.

Đài phun nước thông minh có khả năng trở thành một sản phẩm du lịch đô thị hấp dẫn nhờ sự kết hợp giữa nước, ánh sáng, âm nhạc và công nghệ số. Các chương trình trình diễn có thể được thay đổi theo mùa, theo sự kiện hoặc theo những chủ đề văn hóa đặc trưng, tạo nên trải nghiệm mới mẻ cho người dân và du khách.

Đối với Hà Nội, nơi đang từng bước mở rộng các tuyến phố đi bộ, không gian văn hóa công cộng và các hoạt động kinh tế đêm, đài phun nước thông minh có thể trở thành một điểm đến mới, góp phần kéo dài thời gian lưu trú, gia tăng mức chi tiêu của du khách và nâng cao sức hấp dẫn của Thủ đô.

Góp phần xây dựng đô thị thông minh, sáng tạo và phát triển bền vững

Bên cạnh các giá trị về văn hóa và cảnh quan, đài phun nước thông minh còn đóng góp vào mục tiêu xây dựng đô thị thông minh và phát triển bền vững. Việc ứng dụng công nghệ cảm biến, quản lý dữ liệu thời gian thực, hệ thống tuần hoàn nước và các giải pháp tiết kiệm năng lượng giúp nâng cao hiệu quả vận hành, giảm chi phí quản lý và hạn chế tác động đến môi trường. Đồng thời, hệ thống đài phun nước còn góp phần cải thiện vi khí hậu đô thị thông qua quá trình bay hơi nước, làm giảm nhiệt độ bề mặt, tăng độ ẩm không khí và nâng cao cảm giác tiện nghi tại các không gian công cộng. Đây là một giải pháp hỗ trợ thích ứng với biến đổi khí hậu và giảm hiệu ứng đảo nhiệt tại các khu vực trung tâm có mật độ xây dựng cao.

Trong xu thế phát triển đô thị sáng tạo, đài phun nước thông minh còn là nơi giao thoa giữa công nghệ, nghệ thuật, văn hóa và đời sống cộng đồng. Vì vậy, loại hình công trình này không chỉ đơn thuần là một hạng mục hạ tầng cảnh quan mà còn là công cụ quan trọng trong việc kiến tạo bản sắc, nâng cao sức hấp dẫn và gia tăng năng lực cạnh tranh của đô thị.

Đối với Hà Nội, việc phát triển các đài phun nước thông minh mang bản sắc riêng sẽ góp phần kết nối giữa di sản và hiện đại, giữa văn hóa truyền thống và công nghệ số, qua đó xây dựng hình ảnh một Thủ đô văn hiến, sáng tạo và phát triển bền vững trong thế kỷ 21. Thông qua kết nối với Trung tâm điều hành thông minh của thành phố (IOC), hệ thống đài phun nước có thể cung cấp dữ liệu vận hành theo thời gian thực, hỗ trợ quản lý năng lượng, cảnh báo sự cố và tối ưu hóa khai thác không gian công cộng.

KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ BÀI HỌC CHO HÀ NỘI

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy đài phun nước thông minh không tồn tại dưới một mô hình duy nhất, mà được phát triển theo nhiều hướng khác nhau tùy thuộc vào đặc điểm địa điểm, mục tiêu sử dụng và năng lực quản lý của từng đô thị. Crown Fountain tại Chicago nhấn mạnh sự tương tác và bản sắc cộng đồng; Madrid Río coi nước là tiện ích phục vụ vui chơi, nghỉ ngơi và làm mát; Spectra tại Singapore khai thác nghệ thuật trình diễn để kể chuyện đô thị, thúc đẩy hoạt động kinh tế đêm; trong khi Benthemplein tại Rotterdam tích hợp không gian công cộng với quản lý nước mưa và thích ứng khí hậu. Bên cạnh đó, mô hình nước tuần hoàn cho thấy xu hướng chuyển từ sử dụng nước theo tuyến tính sang thu gom, xử lý và tái sử dụng trong toàn bộ vòng đời công trình.

Việc đối chiếu các trường hợp này cho phép nhận diện đồng thời giá trị nổi bật, yếu tố công nghệ - môi trường và các điều kiện cần thiết để áp dụng. Kết quả tổng hợp cho thấy hiệu quả của đài phun nước không chỉ phụ thuộc vào mức độ hiện đại của thiết bị, mà còn chịu tác động của chất lượng thiết kế không gian, điều kiện khí hậu, khả năng bảo trì, nguồn lực vận hành và mức độ gắn kết với hoạt động đô thị xung quanh.

Đối với Hà Nội, bài học cốt lõi là cần lựa chọn mô hình đài phun nước phù hợp với từng loại hình không gian, điều kiện khí hậu và năng lực vận hành, ưu tiên bản sắc địa điểm, tiện nghi cộng đồng, tuần hoàn nước và hiệu quả năng lượng hơn là chạy theo quy mô và hiệu ứng trình diễn.

ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐÀI PHUN NƯỚC THÔNG MINH TRONG KIẾN TẠO BẢN SẮC VÀ PHÁT TRIỂN ĐÔ THỊ HIỆN ĐẠI TẠI THỦ ĐÔ HÀ NỘI

Là trung tâm chính trị, hành chính, văn hóa của cả nước và đô thị có lịch sử hơn một nghìn năm phát triển, Hà Nội sở hữu hệ thống di sản phong phú cùng mạng lưới không gian công cộng đa dạng gồm hồ, công viên, quảng trường, phố đi bộ và các khu đô thị mới. Tuy nhiên, hệ thống đài phun nước hiện nay còn chưa nhiều, chủ yếu là các công trình truyền thống, chưa ứng dụng rộng rãi công nghệ số, chưa hình thành các chương trình nghệ thuật định kỳ và chưa trở thành sản phẩm du lịch đặc sắc của Thủ đô.

Trong những năm gần đây, Hà Nội đang đẩy mạnh xây dựng đô thị thông minh, phát triển kinh tế đêm, mở rộng không gian đi bộ và nâng cao chất lượng cảnh quan đô thị. Đây là những điều kiện thuận lợi để nghiên cứu và phát triển hệ thống đài phun nước thông minh nhằm tạo thêm điểm nhấn cho không gian công cộng, phục vụ người dân và du khách.

Việc phát triển đài phun nước thông minh tại Hà Nội cần được đặt trong tổng thể chiến lược xây dựng đô thị thông minh, thành phố sáng tạo và nâng cao chất lượng sống. Trước hết, đài phun nước thông minh phải là một thành phần của hệ thống không gian công cộng đô thị, phục vụ cộng đồng và góp phần nâng cao chất lượng môi trường sống. Đồng thời, công nghệ phải hướng tới mục tiêu bảo tồn, tôn vinh và lan tỏa các giá trị văn hóa của Thăng Long - Hà Nội, tránh chạy theo hình thức hoặc các giải pháp trình diễn đơn thuần.

Trên cơ sở hệ thống không gian công cộng hiện có, có thể nghiên cứu phát triển đài phun nước thông minh tại một số khu vực trọng điểm như: khu vực hồ Hoàn Kiếm với vai trò trung tâm di sản; Hồ Tây gắn với du lịch văn hóa; khu vực hồ Thiền Quang - Công viên Thống Nhất; hành lang sông Hồng

Bảng 1. Tổng hợp một số kinh nghiệm quốc tế

Trường hợp	Giá trị nổi bật	Yếu tố công nghệ - môi trường	Hạn chế hoặc điều kiện áp dụng
Crown Fountain, Chicago	Tương tác trực tiếp; hình ảnh cư dân tạo bản sắc cộng đồng	Màn hình số, điều khiển vòi phun, bể nước nông	Yêu cầu cao về chất lượng nước, bề mặt, an toàn và chế độ bảo trì
Madrid Río, Madrid	Nước là tiện ích vui chơi, nghỉ ngơi và làm mát hằng ngày	Mặt nước, vòi phun nhiều độ cao và phun sương	Hiệu quả nhiệt phụ thuộc độ ẩm, gió, bóng mát và thời gian vận hành
Spectra, Singapore	Kể chuyện đô thị; tạo hoạt động ban đêm và sức hấp dẫn du lịch	Lập trình nước, ánh sáng, laser, trình chiếu và âm thanh	Chi phí vận hành lớn; cần dòng khách, dịch vụ và quản lý chuyên nghiệp
Benthemplein, Rotterdam	Kết hợp không gian công cộng với trữ và quản lý nước mưa	Thu gom nước lộ thiên, ba bể trữ, sử dụng linh hoạt khi khô	Cần thiết kế đồng bộ từ quy hoạch thoát nước đến cảnh quan
Hệ thống nước tuần hoàn	Giảm nhu cầu nước mới và lượng nước xả bỏ	Thu gom, lọc, lưu trữ, xử lý và tái sử dụng	Phải kiểm soát chất lượng nước và chi phí vòng đời

đang được quy hoạch và các khu đô thị mới phía Tây và phía Bắc thành phố.

Khác với nhiều đô thị trên thế giới chủ yếu nhấn mạnh hiệu ứng kỹ thuật, Hà Nội cần tập trung khai thác chiều sâu văn hóa trong các chương trình trình diễn của đài phun nước thông minh. Một số chủ đề có thể nghiên cứu gồm: "Thăng Long - Rồng bay", "Hồ Gươm và truyền thuyết trả gươm", "Khuê Văn Các và truyền thống hiếu học", "Hà Nội bốn mùa", "Hà Nội - Thành phố vì hòa bình", "Hà Nội - Thành phố sáng tạo" và "Dòng chảy sông Hồng với sự hình thành đô thị Thăng Long".

Bên cạnh đó, cần xây dựng cơ chế quản lý và vận hành theo hướng ứng dụng công nghệ số, tăng cường phối hợp liên ngành và đẩy mạnh xã hội hóa đầu tư. Hệ thống đài phun nước cần được kết nối với Trung tâm điều hành thông minh của Thành phố để giám sát các thông số vận hành theo thời gian thực, đồng thời ưu tiên áp dụng các giải pháp tuần hoàn nước, tiết kiệm năng lượng và sử dụng công nghệ thân thiện với môi trường.

Với những định hướng trên, đài phun nước thông minh có thể trở thành một thành tố quan trọng trong hệ thống không gian công cộng của Thủ đô, góp phần nâng cao chất lượng sống, quảng bá hình ảnh Hà Nội và tạo dựng những biểu tượng đô thị mới trong thời kỳ chuyển đổi số.

KẾT LUẬN

Trong xu thế phát triển đô thị thông minh và đô thị sáng tạo trên thế giới, các công trình cảnh quan ứng dụng công nghệ hiện đại ngày càng giữ vai trò quan trọng trong việc nâng cao chất lượng không gian công cộng và gia tăng sức hấp dẫn của đô thị. Đài phun nước thông minh là một trong những loại hình công trình tiêu biểu cho sự kết hợp giữa công nghệ, nghệ thuật, môi trường và văn hóa.

Thông qua việc ứng dụng các công nghệ điều khiển tự động, cảm biến, Internet vạn vật (IoT), trình diễn ánh sáng và âm thanh, đài phun nước thông minh không chỉ nâng cao hiệu quả vận hành, tiết kiệm tài nguyên mà còn tạo ra những trải nghiệm mới cho cộng đồng. Quan trọng hơn, đây còn là phương tiện có khả năng truyền tải các giá trị lịch sử, văn hóa và bản sắc địa phương thông qua ngôn ngữ của nước, ánh sáng và nghệ thuật trình diễn.

Đối với Thủ đô Hà Nội, nơi hội tụ chiều sâu lịch sử hơn một nghìn năm văn hiến cùng khát vọng phát triển thành đô thị thông minh, thành phố sáng tạo và trung tâm văn hóa lớn của cả nước, đài phun nước thông minh có tiềm năng trở thành một thành tố quan trọng trong hệ thống không gian công cộng hiện đại. Nếu được nghiên cứu, quy hoạch và đầu tư phù hợp, các công trình này không chỉ góp phần nâng cao chất lượng cảnh quan đô thị mà còn trở thành những không gian kể chuyện về lịch sử, văn hóa và con người Hà Nội bằng ngôn ngữ của công nghệ hiện đại.

Từ kinh nghiệm quốc tế và những điều kiện đặc thù của Hà Nội, có thể khẳng định rằng việc phát triển đài phun nước thông minh cần hướng tới mục tiêu tạo dựng bản sắc riêng cho Thủ đô, gắn kết giữa di sản và hiện đại, giữa công nghệ và văn hóa, giữa không gian công cộng và đời sống cộng đồng.

Hà Nội không nhất thiết phải xây dựng những đài phun nước lớn nhất hay hiện đại nhất, mà cần những đài phun nước thông minh kể được câu chuyện riêng của Thăng Long - Hà Nội. Đó không chỉ là câu chuyện của một đô thị nghìn năm văn hiến mà còn là câu chuyện của một Thủ đô đang vươn mình mạnh mẽ trên con đường phát triển xanh, thông minh và bền vững trong thế kỷ 21.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

A. Tài liệu tiếng Việt

1. Bộ Chính trị (2022), Nghị quyết số 15-NQ/TW ngày 05/5/2022 về phương hướng, nhiệm vụ phát triển Thủ đô Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.
2. Bộ Xây dựng (2023), Định hướng phát triển hệ thống đô thị Việt Nam gắn với tăng trưởng xanh và chuyển đổi số.
3. Quốc hội số 02/2026/QH16 Luật Thủ đô
4. Thủ tướng Chính phủ (2024), Quy hoạch Thủ đô Hà Nội thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050.
5. Thủ tướng Chính phủ (2021), Quyết định phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018-2025 và định hướng đến năm 2030.
6. Traveloka (2026) Lý do không thể bỏ qua nhạc nước Wings of Time ở Singapore
7. Tripadvisor (2026) Đài phun nước ở Madrid - Tây Ban Nha
8. VNExpress - Anh Minh (2017) Đài phun nước từ miệng người dân ở Chicago

B. Tài liệu quốc tế

9. Langie, K., Rybak-Niedziółka, K., & Hubačíková, V. (2022). Principles of Designing Water Elements in Urban Public Spaces. Sustainability
10. De Ůbanisten (2025) Water square Benthemplein in Roterdam
11. Paris Insider Guide (2026). 8 Remarkable Fountains That Helped Create Paris.
12. Tripadiso (2026). Fountain in Singapore.
13. UN-Habitat, (2022). Public Space Site-Specific Assessment Tools and Guidelines.
14. UNESCO (2020), Culture, Urban Future: Global Report on Culture for Sustainable Urban Development.
15. UNESCO Creative Cities Network, Creative Cities for Sustainable Development.
16. World Bank (2023), Smart Cities and Urban Transformation.
17. Gehl, J. (2011), Life Between Buildings: Using Public Space, Island Press.

THỊ TRƯỜNG CÁC-BON VIỆT NAM:

Gắn giảm phát thải với an ninh năng lượng và chuyển đổi xanh

TS NGUYỄN HUY HOẠCH*

Thị trường các-bon đang chuyển từ một công cụ môi trường sang một cấu phần ngày càng quan trọng của chính sách kinh tế, năng lượng và thương mại. Đối với Việt Nam, phát triển thị trường các-bon không chỉ nhằm định giá phát thải khí nhà kính và thực hiện các cam kết về khí hậu, mà còn liên quan trực tiếp đến an ninh năng lượng, năng lực cạnh tranh của nền kinh tế, khả năng tiếp cận các thị trường xuất khẩu và nguồn vốn xanh. Vì vậy, quá trình xây dựng thị trường các-bon cần được đặt trong một tổng thể thống nhất với phát triển hệ thống năng lượng và chuyển đổi xanh. Định giá các-bon cần tạo động lực giảm phát thải, nhưng đồng thời phải bảo đảm doanh nghiệp có khả năng tiếp cận nguồn năng lượng ổn định, chi phí hợp lý và có lộ trình chuyển đổi đủ dài để thích ứng. Bài viết phân tích mối quan hệ giữa thị trường các-bon với ba yêu cầu: bảo đảm an ninh năng lượng, củng cố an ninh kinh tế và thúc đẩy chuyển đổi xanh; từ đó đề xuất một số định hướng để thị trường các-bon trở thành công cụ hỗ trợ chuyển đổi cơ cấu kinh tế, thay vì chỉ tạo thêm chi phí cho doanh nghiệp.

TỪ YÊU CẦU GIẢM PHÁT THẢI ĐẾN MỘT THỊ TRƯỜNG MỚI

Biến đổi khí hậu và yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính đang làm thay đổi cách các nền kinh tế nhìn nhận chi phí, đầu tư và năng lực cạnh tranh. Các-bon không còn chỉ là một vấn đề môi trường, mà ngày càng trở thành một yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định sản xuất, lựa chọn công nghệ, cấu trúc chuỗi cung ứng và khả năng tiếp cận thị trường.

Đối với Việt Nam, vấn đề này càng có ý nghĩa khi nền kinh tế có độ mở thương mại cao, trong khi nhiều ngành sản xuất vẫn sử dụng một lượng đáng kể nhiên liệu hóa thạch. Khi các thị trường xuất khẩu lớn từng bước đưa chi phí phát thải vào các quy định thương mại, doanh nghiệp Việt Nam sẽ phải đối mặt với yêu cầu ngày càng cao về kiểm kê, báo cáo, xác minh và giảm phát thải. Một ví dụ rõ nhất là Cơ chế điều chỉnh biên giới các-bon (CBAM) của Liên minh châu Âu. Sau giai đoạn chuyển tiếp 2023-2025, CBAM bước vào giai đoạn chính thức từ ngày 01/01/2026, áp dụng đối với một số nhóm hàng hóa như xi măng, sắt thép, nhôm, phân bón, điện và hydro. Cơ chế này gắn lượng phát thải hàm chứa trong hàng hóa nhập khẩu với nghĩa vụ khai báo và chi phí các-bon liên quan. Điều đó cho thấy chi phí các-bon đang dần trở thành một yếu tố của thương mại quốc tế. Doanh nghiệp không chỉ cần quan tâm đến giá điện, giá nhiên liệu hay chi phí vốn, mà còn phải tính đến cường độ phát thải và khả năng đáp ứng các yêu cầu về các-bon của thị trường xuất khẩu. Trong bối cảnh đó, việc hình thành thị trường các-bon ở Việt Nam không nên chỉ được nhìn nhận như việc tạo ra một nơi mua bán tín chỉ. Vấn đề quan trọng hơn là hình thành một cơ chế kinh tế tạo ra tín hiệu đủ rõ để doanh nghiệp, nhà đầu tư và các ngành năng lượng có thể đưa chi phí phát thải vào quyết định dài hạn. Nếu được thiết kế phù hợp, thị trường các-bon có thể trở thành một công cụ thúc đẩy chuyển dịch công nghệ và cơ cấu kinh tế. Ngược lại, nếu chỉ tạo thêm nghĩa vụ và chi phí mà chưa tạo được động lực đầu tư, thị trường sẽ khó phát huy đầy đủ vai trò trong quá trình chuyển đổi xanh.

THỊ TRƯỜNG CÁC-BON KHÔNG CHỈ ĐỂ MUA BÁN TÍN CHỈ

Về bản chất, thị trường các-bon là cơ chế đưa chi phí phát thải khí nhà kính vào các quyết định kinh tế. Đây là điểm khác biệt quan trọng so với cách tiếp cận giảm phát thải chỉ dựa trên các quy định hành chính hoặc các mục tiêu định lượng. Trên thị trường các-bon, hai loại hàng hóa quan trọng là hạn ngạch phát thải khí nhà kính và tín chỉ các-bon. Hạn ngạch gắn với giới hạn phát thải được phân bổ cho các cơ sở thuộc diện quản lý; trong khi tín chỉ các-bon phản ánh lượng phát thải được giảm hoặc được hấp thụ theo các tiêu chuẩn, phương pháp và quy định được công nhận.

Tuy nhiên, giá trị của thị trường không chỉ nằm ở khối lượng giao dịch. Điều quan trọng hơn là giá các-bon có tạo ra một tín hiệu đủ rõ để ảnh hưởng đến quyết định đầu tư hay không. Nếu

(*) *Hiệp hội Năng lượng Việt Nam*

giá các-bon quá thấp và không ổn định, doanh nghiệp có thể tiếp tục lựa chọn công nghệ phát thải cao vì chi phí chuyển đổi lớn hơn nhiều so với chi phí các-bon phải trả. Ngược lại, nếu chi phí các-bon tăng quá nhanh khi công nghệ thay thế và nguồn năng lượng sạch chưa sẵn sàng, doanh nghiệp có thể phải chịu một cú sốc chi phí mà chưa có đủ khả năng thích ứng. Do đó, thị trường các-bon cần được nhìn nhận trước hết như một tín hiệu kinh tế mới, chứ không đơn thuần là một thị trường tài chính hoặc một cơ chế giao dịch tín chỉ.

VIỆT NAM ĐÃ BƯỚC SANG GIAI ĐOẠN TRIỂN KHAI THỰC CHẤT

Việt Nam đã xây dựng tương đối đầy đủ những nền tảng ban đầu cho thị trường các-bon. Nghị định số 06/2022/NĐ-CP là một trong những cơ sở pháp lý quan trọng, sau đó được sửa đổi, bổ sung bởi Nghị định số 119/2025/NĐ-CP. Đặc biệt, Quyết định số 232/QĐ-TTg ngày 24/01/2025 của Thủ tướng Chính phủ phê duyệt Đề án Thành lập và phát triển thị trường các-bon tại Việt Nam đã xác định lộ trình cụ thể. Theo đó, giai đoạn từ năm 2025 đến hết năm 2028 là giai đoạn thí điểm thị trường các-bon trên phạm vi toàn quốc và thí điểm Sàn giao dịch các-bon trong nước; từ năm 2029 thị trường chuyển sang giai đoạn vận hành chính thức. Nghị định số 29/2026/NĐ-CP quy định về các hoạt động liên quan đến Sàn giao dịch các-bon trong nước, bao gồm đăng ký, cấp mã, chuyển quyền sở hữu, lưu ký, giao dịch và thanh toán đối với hạn ngạch phát thải khí nhà kính và tín chỉ các-bon đủ điều kiện giao dịch.

Một dấu mốc quan trọng là ngày 29/6/2026, Sàn giao dịch các-bon trong nước được khai trương tại Sở Giao dịch chứng khoán Hà Nội (HNX). HNX cho biết các bên liên quan đã phối hợp xây dựng khung pháp lý, quy định quản lý, vận hành thị trường và hệ thống đăng ký, giao dịch, thanh toán; việc khai trương sàn đánh dấu bước chuyển từ giai đoạn chuẩn bị sang vận hành thực tế. Như vậy, câu chuyện của thị trường các-bon Việt Nam hiện nay không còn dừng ở việc xây dựng chính sách. Thách thức đã chuyển sang giai đoạn vận hành: xác lập phương thức giao dịch, hình thành giá, bảo đảm tính minh bạch của dữ liệu, kiểm soát chất lượng tín chỉ và tạo niềm tin cho các chủ thể tham gia. Đây cũng là giai đoạn cần đặc biệt chú ý đến mối quan hệ giữa thị trường các-bon với thị trường năng lượng. Bởi lẽ, phần lớn lượng phát thải của nền kinh tế có liên quan trực tiếp hoặc gián tiếp đến việc sản xuất và sử dụng năng lượng.

AN NINH NĂNG LƯỢNG PHẢI LÀ MỘT NGUYÊN TẮC CỦA THỊ TRƯỜNG CÁC-BON

Một thị trường các-bon hiệu quả không thể tách rời yêu cầu bảo đảm an ninh năng lượng. Giảm phát thải là mục tiêu quan trọng, nhưng quá trình giảm phát thải phải được thực hiện trong điều kiện nền kinh tế vẫn có đủ năng lượng cho sản xuất và đời sống. Điều này đặc biệt quan trọng với Việt Nam khi nhu cầu điện tiếp tục tăng cùng với quá trình công nghiệp hóa, đô thị hóa và chuyển dịch cơ cấu kinh tế. Những ngành công nghiệp mới như điện tử, bán dẫn, trung tâm dữ liệu, công nghệ cao và logistics đều đòi hỏi nguồn điện ổn định với chất lượng ngày càng cao. Một phụ tải điện mới đáng kể, có tính đặc thù, là đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam. Khi được đưa vào khai thác, hệ thống này sẽ làm tăng nhu cầu điện và đặt ra yêu cầu cao về độ tin cậy của nguồn cung cũng như lưới điện. Vì vậy, nhu cầu điện của đường sắt tốc độ cao không chỉ là vấn đề của ngành giao thông, mà cần được tính toán đồng bộ trong quy hoạch nguồn, lưới điện và yêu cầu bảo đảm cung cấp điện, phù hợp với định hướng bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia. Đồng thời, hiệu quả giảm phát thải của quá trình điện hóa giao thông cũng phụ thuộc vào cơ cấu nguồn điện cung cấp cho hệ thống. Đây là một ví dụ cho thấy phát triển phụ tải điện mới, chuyển dịch cơ cấu năng lượng và giảm phát thải cần được xem xét trong cùng một bài toán. Từ góc độ này, thị trường các-bon không nên tạo ra một sức ép khiến quá trình chuyển đổi năng lượng diễn ra nhanh hơn khả năng bảo đảm cung ứng điện. Mục tiêu cần hướng tới là giảm cường độ phát thải của nền kinh tế nhưng vẫn duy trì được độ tin cậy của hệ thống năng lượng.

KHÔNG THỂ "ĐỊNH GIÁ CÁC-BON" MÀ BỎ QUA GIÁ NĂNG LƯỢNG

Trong cơ cấu chi phí của nhiều ngành công nghiệp, năng lượng là một yếu tố quan trọng. Vì vậy, khi đưa chi phí các-bon vào hoạt động sản xuất, cần đánh giá đồng thời tác động của giá điện, giá nhiên liệu và chi phí đầu tư cho công nghệ mới. Nếu chi phí các-bon tăng trong khi giá năng lượng đã ở mức cao, tổng chi phí sản xuất của doanh nghiệp có thể tăng đáng kể. Trong những ngành sử dụng nhiều năng lượng, điều này có thể tác động trực tiếp đến khả năng cạnh tranh, đặc biệt đối với những doanh nghiệp phải cạnh tranh trên thị trường quốc tế. Ngược lại, nếu giá các-bon được thiết kế hợp lý và có lộ trình rõ ràng, doanh nghiệp sẽ có cơ sở để tính toán thời điểm thay đổi công nghệ, đầu tư tiết kiệm năng lượng, sử dụng điện sạch hoặc chuyển sang các nguồn nhiên liệu có cường độ phát thải thấp hơn. Vì vậy, chính sách các-bon cần được xây dựng đồng bộ với chính sách năng lượng. Giá các-bon không nên được xem như một khoản chi phí độc lập, mà phải được đặt trong tổng thể chi phí năng lượng và chi phí chuyển đổi của doanh nghiệp. Đây cũng là lý do cần có một lộ trình đủ dài. Doanh nghiệp không thể thay đổi công nghệ, thiết bị và chuỗi cung ứng chỉ trong một vài năm. Một chính sách có tính dự báo cao sẽ giúp doanh nghiệp chủ động hơn và giảm nguy cơ chuyển đổi bị động.

CÁC-BON PHẢI TRỞ THÀNH TÍN HIỆU ĐẦU TƯ, KHÔNG CHỈ LÀ NGHĨA VỤ

Mục tiêu cuối cùng của định giá các-bon không phải là thu thêm một khoản chi phí, mà là làm thay đổi hành vi đầu tư theo hướng phát thải thấp hơn. Một dự án sử dụng công nghệ phát thải cao có thể có chi phí đầu tư ban đầu thấp hơn, nhưng nếu phải chịu chi phí các-bon ngày càng lớn trong suốt vòng đời dự án, lợi thế ban đầu có thể giảm dần. Ngược lại, công nghệ có mức phát thải thấp có thể có chi phí đầu tư cao hơn nhưng trở nên hấp dẫn hơn khi chi phí các-bon được phản ánh đầy đủ. Đây chính là vai trò quan trọng nhất của giá các-bon: tạo ra tín hiệu để thị trường tự điều chỉnh lựa chọn công nghệ. Trong lĩnh vực năng lượng, tín hiệu này càng quan trọng. Các dự án điện có thời gian thu hồi vốn dài, trong khi quyết định

đầu tư hôm nay có thể ảnh hưởng đến cơ cấu nguồn điện trong hàng chục năm. Nếu giá các-bon được dự báo ổn định, nhà đầu tư có thể tính toán tốt hơn hiệu quả kinh tế của các dự án điện tái tạo, lưu trữ năng lượng, tiết kiệm năng lượng, nâng cao hiệu suất và các giải pháp giảm phát thải khác. Do đó, thị trường các-bon cần được kết nối với chiến lược đầu tư dài hạn của nền kinh tế, thay vì chỉ được xem như một công cụ để thực hiện nghĩa vụ giảm phát thải.

AN NINH KINH TẾ: VẤN ĐỀ KHÔNG CHỈ NẰM Ở CHI PHÍ CÁC-BON

An ninh kinh tế trong bối cảnh chuyển đổi xanh không chỉ liên quan đến việc doanh nghiệp phải trả bao nhiêu cho phát thải. Vấn đề rộng hơn là nền kinh tế có đủ năng lực thích ứng với những thay đổi về tiêu chuẩn môi trường, công nghệ, chuỗi cung ứng và dòng vốn quốc tế hay không. Các doanh nghiệp xuất khẩu có thể phải đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu: kiểm kê phát thải, chứng minh nguồn gốc dữ liệu, xác minh lượng phát thải và giảm cường độ các-bon của sản phẩm. Do đó, năng lực quản trị dữ liệu và quản trị phát thải sẽ dần trở thành một phần của năng lực cạnh tranh. Trong điều kiện đó, thị trường các-bon trong nước có thể tạo ra một lợi thế quan trọng nếu hình thành được hệ thống dữ liệu đáng tin cậy, phương pháp đo đạc, báo cáo và thẩm tra (MRV) minh bạch, cùng với cơ chế xác nhận tín chỉ phù hợp với các yêu cầu quốc tế. Ngược lại, nếu doanh nghiệp Việt Nam phải phụ thuộc hoàn toàn vào các cơ chế bên ngoài để chứng minh lượng phát thải và giá trị giảm phát thải, một phần giá trị kinh tế của quá trình chuyển đổi xanh có thể bị chuyển ra ngoài nền kinh tế. Vì vậy, phát triển thị trường các-bon cũng cần được xem là một bộ phận của năng lực cạnh tranh quốc gia. Thị trường càng minh bạch, dữ liệu càng đáng tin cậy và phương pháp tính toán càng tương thích với quốc tế, doanh nghiệp càng có cơ sở để chủ động tham gia các chuỗi cung ứng xanh.

THỊ TRƯỜNG CÁC-BON CẦN ĐƯỢC KẾT NỐI VỚI THỊ TRƯỜNG ĐIỆN

Mối quan hệ giữa thị trường các-bon và thị trường điện đặc biệt quan trọng vì ngành điện vừa là một trong những nguồn phát thải lớn, vừa là nền tảng để điện hóa nhiều lĩnh vực khác của nền kinh tế. Khi tỷ trọng điện sạch tăng lên, giá trị của điện có cường độ phát thải thấp sẽ ngày càng được quan tâm. Tuy nhiên, để biến giá trị này thành tín hiệu kinh tế thực sự, cần có cơ chế đo lường và xác nhận rõ ràng về nguồn gốc, sản lượng và thuộc tính môi trường của điện năng. Điều đó đặt ra yêu cầu kết nối giữa thị trường điện, thị trường các-bon và các cơ chế mua bán điện trực tiếp, lưu trữ năng lượng, phát triển điện mặt trời mái nhà và các giải pháp sử dụng điện sạch khác. Một kWh điện sạch không chỉ có giá trị ở lượng điện năng được cung cấp, mà còn có thể tạo ra giá trị kinh tế từ khả năng giảm phát thải. Tuy nhiên, giá trị này chỉ có thể được xác lập khi dữ liệu được đo lường, xác nhận và công nhận theo những quy tắc minh bạch. Đây là lĩnh vực Việt Nam cần chuẩn bị sớm. Nếu thị trường điện và thị trường các-bon phát triển theo hai hướng tách biệt, doanh nghiệp sẽ khó nhìn thấy đầy đủ chi phí và lợi ích của việc chuyển đổi sang nguồn điện phát thải thấp. Ngược lại, nếu hai thị trường được thiết kế có khả năng tương tác, tín hiệu giá có thể hỗ trợ tốt hơn cho quyết định đầu tư vào nguồn điện sạch, hệ thống lưu trữ và các giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng.

CHUYỂN ĐỔI XANH KHÔNG ĐỒNG NGHĨA VỚI LOẠI BỎ NHANH MỌI NGUỒN NĂNG LƯỢNG HÓA THẠCH

Một trong những vấn đề cần được nhìn nhận thực tế là quá trình chuyển đổi xanh không thể đồng nghĩa với việc loại bỏ nhanh chóng mọi nguồn năng lượng hóa thạch. Trong giai đoạn chuyển tiếp, nền kinh tế vẫn cần những nguồn năng lượng có khả năng cung cấp ổn định và linh hoạt để bảo đảm cân bằng hệ thống. Trong khi đó, tỷ trọng các nguồn điện biến đổi như gió và mặt trời ngày càng tăng, đòi hỏi hệ thống phải có thêm khả năng dự phòng, lưu trữ và điều chỉnh phụ tải. Vì vậy, chính sách giảm phát thải cần hướng tới giảm dần cường độ các-bon của hệ thống năng lượng, nâng cao hiệu suất sử dụng nhiên liệu và thúc đẩy các công nghệ phát thải thấp, thay vì đặt ra một lộ trình cứng nhắc không gắn với khả năng đáp ứng của hệ thống. Điều quan trọng là phải tạo ra tín hiệu đủ rõ để các nguồn năng lượng phát thải cao từng bước giảm lợi thế kinh tế, trong khi các nguồn năng lượng sạch và công nghệ giảm phát thải có thêm điều kiện để phát triển. Đây cũng là cách tiếp cận phù hợp với yêu cầu bảo đảm an ninh năng lượng: chuyển đổi phải có lộ trình, có nguồn thay thế và có khả năng kiểm soát rủi ro cung ứng.

TRÁNH TÌNH TRẠNG "CÁC-BON RẺ TRÊN GIẤY, ĐẮT TRONG THỰC TẾ"

Một thị trường các-bon chỉ có ý nghĩa khi giá các-bon phản ánh tương đối đúng chi phí xã hội và kinh tế của phát thải. Nếu giá quá thấp, tín hiệu giảm phát thải sẽ yếu. Nhưng nếu chi phí được đẩy lên nhanh hơn khả năng chuyển đổi của nền kinh tế, tác động có thể chuyển thành áp lực chi phí đối với doanh nghiệp và người tiêu dùng. Vì vậy, vấn đề không chỉ là xác định một mức giá các-bon, mà là xây dựng một cơ chế hình thành giá có tính minh bạch, có khả năng dự báo và phản ánh được cung - cầu của thị trường. Đồng thời, cần tránh tình trạng doanh nghiệp phải chịu nhiều lớp chi phí cho cùng một mục tiêu giảm phát thải nhưng lại không được hưởng đầy đủ lợi ích từ việc đầu tư xanh. Một dự án giảm phát thải cần có khả năng tiếp cận tín chỉ, nguồn vốn xanh, ưu đãi công nghệ hoặc các cơ chế hỗ trợ phù hợp để bù đắp một phần chi phí chuyển đổi. Nếu không giải quyết được vấn đề này, thị trường các-bon có thể tạo ra nghĩa vụ nhưng chưa tạo được động lực. Ngược lại, khi giá các-bon trở thành một tín hiệu đầu tư ổn định, doanh nghiệp sẽ có thêm cơ sở để cân nhắc giữa chi phí hiện tại và lợi ích dài hạn của công nghệ phát thải thấp.

NGUỒN LỰC TỪ CÁC-BON CẦN QUAY TRỞ LẠI PHỤC VỤ CHUYỂN ĐỔI XANH

Một câu hỏi quan trọng khác là nguồn lực kinh tế hình thành từ thị trường các-bon sẽ được sử dụng như thế nào. Nếu một phần nguồn lực liên quan đến các-bon được tái đầu tư vào tiết

kiệm năng lượng, đổi mới công nghệ, phát triển nguồn điện sạch, hệ thống lưu trữ, lưới điện và nâng cao năng lực MRV, thị trường các-bon sẽ tạo ra một vòng tuần hoàn tích cực: phát thải được định giá, nguồn lực được hình thành và nguồn lực đó lại được sử dụng để giảm phát thải. Cách tiếp cận này có ý nghĩa đặc biệt đối với các doanh nghiệp có khả năng tài chính hạn chế. Không phải doanh nghiệp nào cũng có thể tự mình đầu tư ngay vào công nghệ mới chỉ vì giá các-bon tăng. Do đó, chính sách hỗ trợ cần hướng vào việc giảm chi phí chuyển đổi, nhất là thông qua tín dụng xanh, hỗ trợ công nghệ, nâng cao hiệu quả năng lượng và phát triển hạ tầng dùng chung. Khi đó, thị trường các-bon không chỉ là cơ chế "thu - chi" đối với phát thải, mà có thể trở thành một nguồn lực hỗ trợ quá trình tái cấu trúc nền kinh tế.

CẦN MỘT LỘ TRÌNH ĐỦ DÀI VÀ ỔN ĐỊNH CHO DOANH NGHIỆP

Một trong những điều kiện quyết định thành công của thị trường các-bon là khả năng dự báo chính sách. Doanh nghiệp cần biết trước các yêu cầu về hạn ngạch, kiểm kê phát thải, MRV, tín chỉ, phương thức giao dịch và nghĩa vụ tài chính trong những năm tới. Nếu các quy định thay đổi quá nhanh hoặc thiếu sự liên kết giữa các chính sách, doanh nghiệp sẽ khó xây dựng kế hoạch đầu tư dài hạn. Lộ trình đến năm 2029, khi thị trường các-bon chuyển sang giai đoạn vận hành chính thức, vì vậy cần được sử dụng như một khoảng thời gian để hoàn thiện thể chế, hạ tầng dữ liệu và năng lực thị trường, đồng thời giúp doanh nghiệp chuẩn bị. Quyết định 232/QĐ-TTg đã xác lập giai đoạn 2025-2028 là giai đoạn thí điểm và từ năm 2029 là giai đoạn vận hành chính thức. Trong khoảng thời gian này, điều quan trọng không chỉ là số lượng giao dịch trên sàn, mà còn là chất lượng của dữ liệu, tính minh bạch của giá, khả năng xác minh tín chỉ và mức độ tham gia thực chất của doanh nghiệp. Thị trường chỉ có thể phát triển bền vững khi các chủ thể tin rằng những quy tắc hôm nay sẽ tiếp tục có giá trị trong các quyết định đầu tư của ngày mai.

KHÔNG ĐỂ THỊ TRƯỜNG CÁC-BON TRỞ THÀNH MỘT THỊ TRƯỜNG "TÁCH RỜI" KHỎI NỀN KINH TẾ

Thị trường các-bon chỉ phát huy đầy đủ vai trò khi được đặt trong tổng thể các chính sách về năng lượng, công nghiệp, thương mại, tài chính và đầu tư. Đối với Việt Nam, điều này có nghĩa là quá trình phát triển thị trường các-bon cần được liên kết với quá trình thực hiện các mục tiêu về an ninh năng lượng, chuyển đổi cơ cấu nguồn điện, phát triển lưới điện, sử dụng năng lượng tiết kiệm và hiệu quả, phát triển năng lượng tái tạo và nâng cao năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp. Nghị quyết số 70-NQ/TW ngày 20/8/2025 của Bộ Chính trị về bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 cũng đặt vấn đề phát triển thị trường năng lượng cạnh tranh, phát triển năng lượng sạch và xây dựng các cơ chế về MRV, thị trường các-bon. Chương trình hành động của Chính phủ thực hiện Nghị quyết này được ban hành tại Nghị quyết số 328/NQ-CP ngày 13/10/2025. Những định hướng đó cho thấy thị trường các-bon không thể được xem là một cấu phần đứng ngoài hệ thống năng lượng và nền kinh tế. Ngược lại, thị trường này cần góp phần tạo ra tín hiệu kinh tế hỗ trợ những thay đổi đang diễn ra trong cơ cấu năng lượng và mô hình tăng trưởng. Một thị trường các-bon tốt không nhất thiết là thị trường có mức giá các-bon cao nhất, mà là thị trường tạo được tín hiệu đủ rõ, minh bạch và ổn định để doanh nghiệp có thể thay đổi công nghệ, nhà đầu tư có thể điều chỉnh dòng vốn và hệ thống năng lượng có thể chuyển đổi mà không làm suy giảm an ninh cung ứng.

KẾT LUẬN

Việc khai trương Sàn giao dịch các-bon trong nước ngày 29/6/2026 đánh dấu một bước tiến quan trọng trong quá trình hình thành thị trường các-bon tại Việt Nam. Từ nay, trọng tâm không còn chỉ là xây dựng khung pháp lý, mà là làm cho thị trường vận hành minh bạch, hiệu quả và thực sự tạo ra tín hiệu kinh tế. Điều cần tránh là nhìn thị trường các-bon như một cơ chế đơn thuần làm tăng chi phí đối với doanh nghiệp. Nếu được thiết kế và vận hành phù hợp, đây có thể trở thành công cụ thúc đẩy đổi mới công nghệ, điều chỉnh dòng vốn, nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và hỗ trợ chuyển đổi xanh. Để đạt được mục tiêu đó, ba yêu cầu cần được đặt trong cùng một bài toán: bảo đảm an ninh năng lượng, củng cố an ninh kinh tế và giảm phát thải. Giá các-bon phải đủ sức tạo động lực thay đổi, nhưng lộ trình thay đổi phải phù hợp với khả năng cung ứng năng lượng, năng lực công nghệ và sức chịu đựng của doanh nghiệp. Đặc biệt, thị trường các-bon cần được kết nối với thị trường điện và các chính sách năng lượng. Khi giá các-bon trở thành một tín hiệu đầu tư có thể dự báo, doanh nghiệp sẽ có thêm cơ sở để lựa chọn công nghệ phát thải thấp; nhà đầu tư có thêm động lực đưa vốn vào năng lượng sạch và các giải pháp lưu trữ; còn nền kinh tế có thêm một công cụ để chuyển dịch cơ cấu tăng trưởng. Vì vậy, phát triển thị trường các-bon không nên được hiểu đơn giản là tạo thêm một thị trường mới. Vấn đề cốt lõi là xây dựng một tín hiệu kinh tế mới cho quá trình chuyển đổi - trong đó giảm phát thải đi cùng với bảo đảm năng lượng, duy trì năng lực cạnh tranh và tạo nền tảng cho tăng trưởng xanh.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. Bộ Chính trị, Nghị quyết số 70-NQ/TW ngày 20/8/2025 về bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.

2. Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 232/QĐ-TTg ngày 24/01/2025 phê duyệt Đề án Thành lập và phát triển thị trường các-bon tại Việt Nam.

3. Chính phủ, Nghị định số 119/2025/NĐ-CP ngày 09/6/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 06/2022/NĐ-CP ngày 07/01/2022 quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn.

4. Chính phủ, Nghị định số 29/2026/NĐ-CP ngày 19/01/2026 về Sàn giao dịch các-bon trong nước.

5. Chính phủ, Nghị quyết số 328/NQ-CP ngày 13/10/2025 ban hành Chương trình hành động của Chính phủ thực hiện Nghị quyết số 70-NQ/TW của Bộ Chính trị.

6. Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 768/QĐ-TTg ngày 15/4/2025 phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050.

7. Sở Giao dịch chứng khoán Hà Nội (HNX), "Lễ khai trương Sàn giao dịch các-bon trong nước", ngày 29/6/2026.

8. European Commission, "CBAM definitive regime", trang thông tin về Cơ chế điều chỉnh biên giới các-bon (CBAM), truy cập năm 2026.

Hồ Gươm ...

KTS PHẠM THANH TÙNG*

50 năm hoặc 100 năm nữa, thế hệ mai sau có còn được nhìn thấy Hồ Gươm như một di sản vô giá được ông cha trao truyền lại, hay chỉ là một công trình cảnh quan hiện đại được thiết kế lại vào năm 2026?

Vừa qua, TP Hà Nội đã tổ chức lấy ý kiến cộng đồng dân cư về phương án Điều chỉnh cục bộ Quy hoạch phân khu đô thị H1-1B (khu vực Hồ Gươm và phụ cận), tỷ lệ 1/2.000 và một phần Quy hoạch phân khu đô thị H1-1C, tỷ lệ 1/2.000 kết hợp giải pháp Quy hoạch chi tiết, tỷ lệ 1/500 cải tạo, chỉnh trang, tái thiết, tái cấu trúc không gian khu vực hồ Hoàn Kiếm và vùng phụ cận với phạm vi nghiên cứu lên tới 65,89 ha, không chỉ riêng mặt hồ. Theo thông báo của chính quyền Thành phố, thì có đến 92% số người tham gia đồng tình với chủ trương cải tạo, chỉnh trang, tái cấu trúc không gian khu vực hồ Hoàn Kiếm và vùng phụ cận.

HỒ GƯƠM, HỒN CỐT CỦA THĂNG LONG - HÀ NỘI

Lịch sử Hồ Gươm được hình thành gắn với địa mạo tự nhiên của Hà Nội cùng những lớp truyền thuyết và lịch sử lâu đời. Đây vốn là dấu tích của một khúc sông Nhị Hà (sông Hồng), từng có tên Lục Thủy, vào thế kỷ 15 thì còn gọi là Hoàn Kiếm gắn với truyền thuyết vua Lê trả lại gươm báu cho Rùa thần sau khi đánh thắng quân nhà Minh ở phương Bắc xâm lược. Như vậy, Hồ Gươm xưa (hồ Thủy Quân) vốn rộng hơn rất nhiều so với hiện nay và có liên quan với mạng lưới sông, hồ cổ ở phía Nam thành Thăng Long. Trải qua hàng ngàn năm biến đổi của dòng chảy sông Hồng và hệ thống sông ngòi cổ, đặc biệt là quá trình đô thị hóa từ thời Nguyễn đến thời Pháp thuộc từ thế kỷ 19 đến đầu thế kỷ 20, diện tích mặt nước hồ tiếp tục thay đổi. Hình dạng Hồ Gươm ngày nay là kết quả của quá trình tự nhiên kéo dài hàng nghìn năm, sự can thiệp của con người khi đô thị hóa và đặc biệt là khi người Pháp tiến hành quy hoạch Hồ Gươm thành trung tâm đô thị theo mô hình đô thị châu Âu vào những năm 1884 - 1886. Nhìn vào Hồ Gươm hiện nay, vẫn thấy khá rõ hai lớp quy hoạch chồng lên nhau: lớp cảnh quan truyền thống của Hà Nội và lớp đô thị thuộc địa do người Pháp tổ chức từ cuối thế kỷ 19. Các công trình kiến trúc quanh hồ vẫn hiện hữu, là chứng nhân của tầng lớp lịch sử ấy, như: Đền Bà Kiệu (1619 - 1628) thời Lê Trung Hưng; Đình Nam Hương (1747), Đền Ngọc Sơn nằm trên đảo Ngọc có kiến trúc từ thời Lê - Trịnh; Tháp Bút - Đài Nghiên (1864 - 1865) thời Nguyễn, do Nguyễn Văn Siêu chủ trì thiết kế xây dựng khi tôn tạo khu đền Ngọc Sơn; Tháp Rùa (1875 - 1877) được xây dựng trước khi người Pháp quy hoạch Hồ Gươm.

Từ khoảng năm 1884 - 1886, chính quyền Pháp bắt đầu chọn khu vực Hồ Gươm làm một trong những hạt nhân để quy hoạch Hà Nội theo mô hình đô thị châu Âu. Quyết định ngày 22/8/1886 và Quyết định ngày 03/11/1886 của Phó Công sứ Hà Nội đã cho phép làm một con đường rộng khoảng 10 m chạy quanh hồ và hạn chế xây dựng

(*) *Chánh văn phòng Trung ương Hội KTS Việt Nam*

nhà tranh dọc tuyến này và dành một dải đất rộng ít nhất 20 m quanh hồ tạo không gian thoáng. Như vậy có thể nói, ý tưởng biến Hồ Gươm thành trung tâm cảnh quan đã có từ lúc đó với "đường bao quanh - khoảng không gian mở với mặt hồ làm trung tâm". Từ đó dần hình thành mạng đường phố, nhà phố thấp tầng mà chúng ta vẫn nhận ra ngày nay, đó là: phố Đinh Tiên Hoàng (Francis Garnier); phố Lê Thái Tổ (Beauchamps); phố Tràng Tiền - Hàng Khay - Tràng Thi (Paul Bert - des Incrusteurs). Các tuyến này cùng với vườn hoa, cây xanh tạo thành một vành đai đô thị bao quanh mặt nước Hồ Gươm và kết nối hồ với khu phố cổ ở phía Bắc, khu phố Pháp và các công trình hành chính ở phía Nam, Đông Nam. Phía Đông và Đông Nam hồ được biến thành trung tâm hành chính. Đây có lẽ là thay đổi lớn nhất. Khu vực này vốn có nhiều ao hồ, đất thấp, làng xóm và một số kiến trúc tín ngưỡng truyền thống bị người Pháp phá bỏ, san lấp… để lấy mặt bằng xây dựng các công trình hành chính quan trọng, gồm: Tòa Đốc lý (Tòa Thị chính); Phủ Thống sứ Bắc Kỳ; Kho bạc Đông Dương; Nhà Bưu điện. Chùa Báo Ân (1842) bị phá hủy (nay chỉ còn dấu tích là Tháp Hòa Phong) để xây nhà Bưu điện… Chùa Phổ Giác (1770 - 1774) bị di dời về vị trí hiện nay ở phố Ngô Sĩ Liên để lấy đất xây cụm công trình hành chính và vườn hoa (nay là vườn hoa Lý Thái Tổ). Vì vậy, có thể nói người Pháp không đơn thuần "làm đẹp Hồ Gươm", mà đã biến Hồ Gươm trở thành trung tâm cảnh quan của một trung tâm đô thị thuộc địa mới.

Cùng với thực hiện quy hoạch này, người Pháp đã đặt ra khá sớm những quy định mang tính quản lý không gian, đường phố và chiều cao công trình quanh Hồ Gươm, dù rằng đó chưa phải là một "quy chế bảo tồn kiến trúc Hồ Gươm" theo nghĩa hiện đại. Điểm đáng chú ý là ý tưởng kiểm soát dải không gian quanh hồ xuất hiện từ năm 1886, tức chỉ vài năm sau khi Pháp bắt đầu quy hoạch lại Hà Nội. Nó cho thấy người Pháp đã nhìn Hồ Gươm không đơn thuần là một mặt nước mà là một không gian cảnh quan cần có khoảng đệm, không để công trình xây dựng áp sát mép hồ. Đến 1891, chính quyền thuộc địa đã ban hành "Quy chế lục lộ Hà Nội", quy định về quản lý đường phố Hà Nội, trong đó xác định chiều rộng lòng đường và vỉa hè cho những phố hiện hữu và những phố dự kiến mở. Các khu vực phía Đông và phía Nam Hồ Gươm có những tuyến được quy định vỉa hè tối thiểu khoảng 5 m, thậm chí một số tuyến rộng hơn. Một điểm đặc biệt đáng chú ý là chiều cao công trình quanh Hồ Gươm cũng được kiểm soát. Theo các tư liệu được dẫn lại, trong giai đoạn đầu thế kỷ 20, các công trình quanh hồ như Ngân hàng Đông Dương, bốt Hàng Trống, nhà hàng Godard... có chiều cao không quá 15 m theo các quy định khi đó. Những công trình được xây dựng hoặc xây lại vào khoảng

năm 1918 như Bưu điện Bờ Hồ và Phủ Thống sứ cũng phải tuân theo nguyên tắc này. Đến đề án quy hoạch được Toàn quyền Đông Dương thông qua năm 1942, giới hạn còn được kiểm soát chặt hơn: nhà xây mới tối đa khoảng 12 m, còn nhà ở khu phố buôn bán cũ khoảng 8,5 m.

Và khá thú vị, khi hiện nay đang có nhiều ý kiến tranh luận về chiều cao các công trình sẽ xây mới tại khu vực xung quanh Hồ Gươm, thì nguyên tắc kiểm soát "hình thái không gian nhìn từ mặt hồ" đã có lịch sử hơn một thế kỷ! Điều này cũng cho thấy, người Pháp không "bảo tồn nguyên trạng" Hồ Gươm mà họ tái thiết Hồ Gươm thành một không gian đô thị cảnh quan, đồng thời đặt ra những giới hạn nhất định về khoảng lùi, đường phố, vỉa hè, chiều cao và hình thái công trình. Đây chính là lý do cấu trúc "mặt nước - dải cây xanh - đường phố - công trình" quanh Hồ Gươm hình thành khá rõ từ thời Pháp.

Chính sự đan xen giữa biểu tượng lịch sử, truyền thống, văn hóa của Việt Nam và kiến trúc đô thị Pháp hiện đại đã làm cho Hồ Gươm đặc biệt. Nó không phải một không gian hoàn toàn "Pháp hóa", mà đây là nơi lịch sử truyền thống và hiện đại, cái cũ và cái mới cùng tồn tại một cách hài hòa để tạo nên một không gian Cảnh quan - lịch sử - di sản văn hóa Hồ Gươm vô cùng quý giá, độc đáo và đặc sắc của Hà Nội nói riêng và cả nước nói chung mà hiếm một thành phố nào trên thế giới có được.

CẢNH QUAN LỊCH SỬ VĂN HÓA KHU VỰC HỒ GƯƠM CẦN ĐƯỢC BẢO TỒN

Nhìn vào bản quy hoạch tỷ lệ 1/500, có thể thấy sự cải tạo, chỉnh trang, tái cấu trúc này được nghiên cứu với ý tưởng kết nối chuỗi không gian công cộng để tạo nên một hệ thống "Hồ Gươm - Quảng trường Cách mạng Tháng Tám - Nhà hát Lớn - Tràng Tiền - các không gian văn hóa" thành không gian "Lịch sử - Văn hóa - Nghệ thuật" - biểu tượng mới của Thủ đô. Nếu thực hiện, dự án có mặt tích cực là tạo ra một hệ thống không gian công cộng liên tục, thuận lợi cho đi bộ và các hoạt động văn hóa - sáng tạo. Nhưng dự án không chỉ cải tạo cảnh quan quanh hồ, mà đặt ra một cuộc tái cấu trúc khá lớn toàn bộ khu vực, bao gồm Quảng trường Đông Kinh Nghĩa Thục ở phía Bắc, phía Đông hồ, khu trụ sở HĐND - UBND Thành phố, Bưu điện Hà Nội, tuyến phố Tràng Tiền - Hàng Khay, Nhà hát Lớn, Bảo tàng Lịch sử Quốc gia…. nếu vậy, thì bản chất của Hồ Gươm là một không gian cảnh quan lịch sử, mặt nước, cây xanh và ký ức sẽ có nguy cơ biến mất. Dự án đưa ra những nội dung nghiên cứu khá lớn: Nghiên cứu 3 - 3,5 tầng hầm ở một vài khu vực quảng trường, công viên; kết nối không gian ngầm với ga C9 hình thành TOD văn hóa - dịch vụ - thương mại; tái cấu trúc khu đất trụ sở HĐND -UBND Thành phố, trong đó phá dỡ Tòa nhà trụ sở HĐND - UBND Thành phố (mà dự án gọi là hạ giải!?) để đề xuất một công trình trụ sở mới với 9 tầng nổi, 3 tầng hầm; phá dỡ một số công trình trong đó có Rạp Khăn quàng đỏ và Cung thiếu nhi Hà Nội; phục dựng chùa Báo Ân trên khu đất nhà Bưu điện; nghiên cứu công trình khách sạn cao cấp ở khu vực phía tây hồ; nghiên cứu xây dựng Tháp Tài chính Quốc tế tại khu đất Bảo tàng Cách mạng cũ (sau khi Bảo tàng này hợp nhất với Bảo tàng Lịch sử Quốc gia) và nhiều nội dung tái thiết lớn khác.

Sau khi nghiên cứu dự án này, tôi cứ băn khoăn, nếu chỉ gọi đây là dự án chỉnh trang, cải tạo Hồ Gươm thì chưa phản ánh hết quy mô thực sự của dự án. Và vì thế, đặt ra những câu hỏi cần được trả lời:

Thứ nhất, giá trị nào của Hồ Gươm là bất khả xâm phạm?

Thứ hai, những gì hiện có đã thực sự xuống cấp và cần cải tạo?

Thứ ba, cái gì cần phục hồi, cái gì cần loại bỏ và cái gì được phép xây mới?

Thứ tư, mức độ can thiệp tối đa vào cảnh quan lịch sử khu vực Hồ Gươm là bao nhiêu? Có làm tăng giá trị của Hồ Gươm hay không?

Thứ năm, nghiên cứu của dự án có vi phạm Luật Di sản văn hóa và các văn bản hướng dẫn liên quan đến việc bảo vệ khu vực di tích cấp quốc gia đặc biệt Hồ Gươm không?; Có vi phạm Quy chế quản lý kiến trúc và Quyết định số

Ảnh: BÙI VĂN DOANH

73/2024/QĐ-UNND của UBND TP Hà Nội (ban hành cuối năm 2024, có hiệu lực từ tháng 01/2025) ban hành Quy chế quản lý kiến trúc TP Hà Nội, trong đó có quy định kiểm soát đặc thù đối với khu vực Hồ Gươm không?

Thứ sáu, có cần lập Bản đồ giá trị di sản Hồ Gươm không? Bản đồ này sẽ cho thấy các lớp giá trị sau:

+ Giá trị lịch sử;
+ Giá trị kiến trúc;
+ Giá trị cảnh quan;
+ Giá trị của hệ sinh thái cây xanh - mặt nước - thủy văn;
+ Giá trị của ký ức cộng đồng;
+ Giá trị tầm nhìn và các trục thị giác.

Và cuối cùng, liệu 50 - 100 năm nữa thế hệ mai sau có còn được nhìn thấy Hồ Gươm như một di sản vô giá được ông cha trao truyền lại, hay chỉ là một công trình cảnh quan hiện đại được thiết kế lại vào năm 2026?

Đây cũng là câu hỏi rất cốt lõi!

Dự án đề cập rất nhiều đến quảng trường, công trình biểu tượng, không gian ngầm, TOD, thương mại - dịch vụ, nhưng liệu các giải pháp đưa ra có thực sự phù hợp với sức chịu tải của di sản Hồ Gươm, với cảnh quan cây xanh, mặt nước, vi khí hậu; địa chất, giao thông, ký ức cộng đồng và không gian sinh hoạt đô thị Hà Nội. Với phạm vi nghiên cứu lên tới 65,89 ha, thực sự là một quy mô lớn, phản ánh thực chất của bài toán tái cấu trúc trung tâm lịch sử Hà Nội, chứ không còn là dự án cải tạo, chỉnh trang cảnh quan đơn thuần. Nếu Hồ Gươm chuyển thành một quảng trường thì nguy cơ các yếu tố tự nhiên và ký ức bị đặt sau nhu cầu tổ chức sự kiện, lễ hội tập trung đông người. Trong khi giá trị đặc biệt của Hồ Gươm chính là sự cân bằng giữa khoảng trống đô thị và thiên nhiên, chứ không phải một quảng trường hiện đại lát đá khổng lồ với các công nghệ âm thanh, chiếu sáng của thời công nghệ số. Khi đề xuất các công trình biểu tượng có chiều cao và khối tích lớn lên tới 36 m hay hơn nữa tại khu vực Hồ Gươm, các nhà lập dự án đã quên rằng, Hồ Gươm đã có một hệ biểu tượng lịch sử rất mạnh và ấn tượng, đó là Quảng trường Đông Kinh Nghĩa Thục - Tháp Rùa - Đền Ngọc Sơn - Cầu Thê Húc - Tháp Bút - Đài Nghiên - mặt nước hồ xanh màu lục thủy và hệ thống cây xanh, kiến trúc cảnh quan rất hài hòa. Tất cả đã tạo nên một hệ biểu tượng, một di sản cảnh quan - lịch sử - văn hóa Hồ Gươm trong lòng Hà Nội mà không cần bất cứ công trình biểu tượng nào xen cấy vào đó. Với quy hoạch đô thị hiện đại, nhiều khi một khoảng trống cần thiết cũng đã là biểu tượng rồi. Sâu xa hơn nữa, Hồ Gươm gắn với truyền thuyết vua Lê trả gươm báu cho Rùa thần, đây chính là thông điệp, là biểu tượng đẹp nhất, rực rỡ nhất về khát vọng hòa bình, về độc lập của dân tộc ta, phản ánh mối quan hệ tốt đẹp giữa con người với lịch sử với thiên nhiên.

THAY LỜI KẾT

Chủ trương cải tạo, chỉnh trang, mở rộng khu vực xung quanh Hồ Gươm là hết sức cần thiết, nó đáp ứng yêu cầu phát triển của khu vực Hồ Gươm trong thời kỳ phát triển mới của Thủ đô, gắn với dự án Trục đại lộ cảnh quan văn hóa sông Hồng trong cấu trúc không gian đô thị Hà Nội mới tầm nhìn 100 năm. Nhưng làm như thế nào, can thiệp đến đâu để khu vực Hồ Gươm không chỉ mãi là di sản cảnh quan lịch sử văn hóa đặc biệt của Thủ đô, mà còn tạo ra một không gian công cộng mới hiện đại, sáng tạo hài hòa với cảnh quan di sản kiến trúc - văn hóa - lịch sử Hồ Gươm, đáp ứng yêu cầu hưởng thụ văn hóa, đi bộ của người dân. Đó là trách nhiệm của chính quyền thành phố!

Để kết thúc bài viết này, tôi xin dẫn lời phát biểu của Tổng Bí thư, Chủ tịch nước Tô Lâm khi nói về định hướng phương án tổ chức lại không gian khu vực Hồ Gươm tại buổi cùng đoàn Đại biểu Quốc hội TP Hà Nội tiếp xúc cử tri của 10 phường trên địa bàn thành phố ngày 29/9/2026:*"Giá trị lịch sử của không gian này được tạo qua nhiều thế hệ. Một công trình mới chỉ nên được lựa chọn khi thực sự làm cho cảnh quan và đời sống công cộng tốt hơn, được giới chuyên môn đánh giá, thuyết phục và được người dân đồng tình trên cơ sở hiểu biết đầy đủ các phương án. Cái này rất quan trọng"* để chúng ta cùng suy ngẫm.❖

GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA:

"Bài toán về nước và câu chuyện vận hành đô thị"

NGUYÊN HẠNH

THU THỦY (thực hiện)

Khoa học bắt đầu từ những câu hỏi, nhưng giá trị của khoa học được nhìn thấy rõ nhất khi lời giải đi vào cuộc sống. Với ngành nước, trước sức ép của ô nhiễm và biến đổi khí hậu, làm thế nào để những nghiên cứu, công nghệ đi vào thực tiễn và mang lại giá trị cho cộng đồng? BTV Tạp chí Xây dựng đã có cuộc trò chuyện với GS.TS Trần Thị Việt Nga, Viện trưởng Viện Công nghệ cao Việt - Nhật, Giảng viên cao cấp Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, về hành trình nghiên cứu và những bài toán mới của ngành nước.

DÒNG CHẢY KHOA HỌC VỀ NƯỚC VÀ NHỮNG GIÁ TRỊ CỐT LÕI

Thưa GS.TS Trần Thị Việt Nga, ngành nước thường được nhìn nhận là một lĩnh vực kỹ thuật khá đặc thù, nhiều công việc thầm lặng và không ít vất vả. Cơ duyên nào đã đưa bà đến với lĩnh vực này và điều gì khiến bà gắn bó với ngành nước cho đến hôm nay?

- Có lẽ với tôi, đến với ngành nước trước hết là một cái "duyên". Tôi sinh ra trong một gia đình có truyền thống khoa học, và bố tôi - GS.TSKH Trần Hữu Uyển, một chuyên gia trong lĩnh vực kỹ thuật cấp thoát nước, là người có ảnh hưởng sâu sắc đến lựa chọn nghề nghiệp của tôi. Từ nhỏ, qua những câu chuyện bố kể về nước, về các công trình và những bài toán kỹ thuật mà ông theo đuổi, tình yêu khoa học được hun đúc dần trong tôi.

Bởi vậy, khi thi vào Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, tôi lựa chọn ngành cấp thoát nước như một điều tự nhiên: Vừa để theo đuổi niềm yêu thích của mình, vừa với mong muốn tiếp bước bố, tiếp nối truyền thống khoa học của gia đình. Và càng học, tôi càng nhận ra đây không chỉ là một ngành kỹ thuật với những con số hay công thức. Đằng sau mỗi bài toán về nước là những vấn đề rất cụ thể của đời sống: Sức khỏe cộng đồng, môi trường, tổ chức đô thị và khả năng phát triển bền vững của một xã hội.

Có phải câu chuyện của ngành nước cũng là câu chuyện của cả một đô thị, thưa bà?

- Đúng vậy! Ban đầu, tôi nhìn ngành nước chủ yếu dưới góc độ kỹ thuật, nhưng càng nghiên cứu, tôi càng thấy bài toán rộng hơn rất nhiều. Chúng ta không thể chỉ quan tâm đến việc xử lý một nguồn nước hay đưa nước "đạt chuẩn", mà phải nhìn cả quá trình: Nguồn nước được lấy từ đâu, được sử dụng như thế nào, sau sử dụng sẽ đi đâu và liệu có thể tiếp tục khai thác giá trị của nguồn nước đó hay không?

Đến hôm nay, những câu hỏi ấy càng trở nên cấp thiết khi biến đổi khí hậu, ô nhiễm nguồn nước, đô thị hóa và nhu cầu sử dụng nước ngày càng lớn, tạo ra nhiều áp lực mới. Vì vậy, hướng nghiên cứu của tôi cũng dần mở rộng từ công nghệ xử lý nước và nước thải sang quản lý nước bền vững, đặc biệt cần nhìn toàn diện ở phạm vi hệ thống, ví dụ quản lý hệ thống nước đô thị cân bằng và thích ứng với biến đổi khí hậu.

Có những bài toán rất cụ thể của đô thị khiến tôi càng thấy rõ điều đó. Chẳng hạn, khi nghiên cứu phục hồi các dòng sông nội đô Hà Nội, không thể chỉ nhìn vào nước mặt hay một giải pháp kỹ thuật xử lý riêng lẻ, mà phải xem xét cả nguồn nước ngầm, nước mưa, và cả nước thải sau xử lý và mối quan hệ động học giữa chúng trong toàn bộ lưu vực. Khi nhìn vấn đề theo cách đó, ngành nước không còn là câu chuyện của một công trình đơn lẻ, mà trở thành câu chuyện về cách chúng ta tổ chức và vận hành cả một đô thị.

Và cũng từ thực tế nghiên cứu đó, tôi nhận ra một vấn đề khác: Một công nghệ có kết quả tốt trong phòng thí nghiệm chưa chắc đã có thể vận hành ổn định ngoài thực tế. Khi đưa

Tôi vẫn nghĩ, làm khoa học cũng giống như quản trị một dòng sông. Có những đoạn dòng chảy mạnh mẽ, có những đoạn quanh co, có lúc tưởng như bị chặn lại bởi những ghềnh đá. Nhưng dòng sông vẫn tìm cách đi về phía trước".

GS.TS Trần Thị Việt Nga

Ảnh: NGUYỄN HÀ HIỆP

công nghệ vào một đô thị cụ thể, còn rất nhiều yếu tố phải tính đến, từ sự biến động của nguồn nước, tải lượng ô nhiễm đến điều kiện vận hành và khả năng duy trì hệ thống trong thời gian dài. Đây cũng là một trong những vấn đề tôi đặc biệt quan tâm trong quá trình nghiên cứu của mình.

Thưa bà, vậy đâu là những vấn đề cấp thiết nhất để bảo đảm nước sạch, an toàn cho các đô thị hiện nay?

- Tôi nghĩ một bài toán cấp thiết của cấp nước đô thị hiện nay là bảo đảm cấp nước an toàn và ổn định một cách chủ động. Nếu trước đây chúng ta tập trung nhiều vào mở rộng hệ thống để người dân được tiếp cận nước sạch, thì hôm nay, yêu cầu còn là duy trì chất lượng nước và khả năng cấp nước liên tục trước những biến động ngày càng khó dự báo.

Trong bài toán ấy, bảo vệ nguồn nước phải là nền tảng. Nguồn nước đang chịu sức ép từ nước thải sinh hoạt, sản xuất, nông nghiệp, cùng với hạn hán, mưa cực đoan và xâm nhập mặn. Công nghệ xử lý dù tiên tiến đến đâu cũng có giới hạn; không thể kỳ vọng một giải pháp công nghệ sẽ luôn bảo đảm hiệu quả nếu nguồn nước tiếp tục suy thoái, ô nhiễm và tích tụ các chất độc hại. Vì vậy, đầu tư cho xử lý nước cần đi cùng với kiểm soát ô nhiễm và bảo vệ nguồn nước ngay từ lưu vực. Đây là điều kiện căn bản để duy trì an toàn cấp nước lâu dài.

Cùng với bảo vệ nguồn nước, quan trắc và cảnh báo sớm giúp chúng ta chuyển từ ứng phó bị động sang phòng ngừa chủ động. Dữ liệu đủ tin cậy và kịp thời cho phép nhận diện những thay đổi về chất lượng nước, dự báo nguy cơ và đưa ra quyết định phù hợp: Điều chỉnh chế độ khai thác, lựa chọn nguồn nước dự phòng hoặc thay đổi quy trình xử lý trước khi sự cố ảnh hưởng đến người dân. Giá trị của quan trắc vì thế không chỉ nằm ở việc đo được bao nhiêu thông số, mà ở khả năng biến dữ liệu thành những hành động bảo vệ an toàn cấp nước.

Trên nền tảng đó, công nghệ tiên tiến giữ vai trò cốt lõi trong xử lý các chất ô nhiễm và nâng cao khả năng thích ứng của nhà máy. Tuy nhiên, nước đạt yêu cầu sau xử lý vẫn có thể bị tái nhiễm bẩn khi đi vận chuyển trên mạng lưới đường ống và ở công trình lưu trữ. Do đó, quản lý rủi ro về chất lượng nước phải bao quát toàn bộ hệ thống: nhận diện nguy cơ, thiết lập các biện pháp kiểm soát, giám sát hiệu quả và chuẩn bị phương án ứng phó khi có bất thường.

Điều tôi muốn nhấn mạnh là nước sạch không chỉ là một dịch vụ hạ tầng, mà còn gắn trực tiếp với sức khỏe cộng đồng và an ninh nguồn nước. Đích đến của ngành nước, vì thế không chỉ là những nhà máy hiện đại, mà là một hệ thống có nguồn nước được bảo vệ, công nghệ xử lý phù hợp, nguy cơ được phát hiện sớm, và rủi ro được kiểm soát tốt - để người dân có thể yên tâm với nguồn nước mình sử dụng mỗi ngày.

DÒNG CHẢY QUY HOẠCH - ĐẦU TƯ - VẬN HÀNH

Ở những đô thị lớn như Hà Nội và TP.HCM, ngập úng, ô nhiễm nguồn nước hay áp lực bảo đảm nước sạch đang

đặt ra ngày càng rõ. Từ góc nhìn của bà, đâu là những điểm nghẽn lớn nhất trong quy hoạch và phát triển đồng bộ hạ tầng ngành nước hiện nay?

- Theo tôi, điểm nghẽn lớn nhất là hạ tầng ngành nước vẫn chưa được quy hoạch và phát triển như một hệ thống thống nhất. Cấp nước, thoát nước mưa, thu gom và xử lý nước thải, bảo vệ sông hồ có quan hệ rất chặt chẽ, nhưng trong quy hoạch và đầu tư vẫn thường được giải quyết theo từng lĩnh vực, từng dự án hoặc từng địa bàn. Trong khi đó, nước vận động theo lưu vực, không theo ranh giới hành chính; giải quyết vấn đề ở một nơi cần tính đến tác động đối với những nơi khác.

Điểm nghẽn thứ hai là sự thiếu đồng bộ giữa phát triển đô thị và năng lực của hạ tầng nước. Khi dân số, mật độ xây dựng và diện tích bề mặt bê tông hóa tăng lên, nhu cầu cấp nước và lượng nước cần tiêu thoát cũng thay đổi. Nếu hạ tầng không được chuẩn bị tương ứng, hoặc không gian trữ nước và khả năng thoát nước tự nhiên bị thu hẹp, thì chỉ nâng công suất nhà máy hay mở rộng một số tuyến cống sẽ khó giải quyết căn bản vấn đề. Quy hoạch cần dành chỗ cho nước ngay từ đầu: từ hành lang sông, hồ điều hòa đến những không gian có khả năng thấm và giữ nước.

Một điểm nghẽn khác nằm ở cách tổ chức đầu tư. Nhà máy, đường ống, mạng lưới thu gom và các công trình điều tiết phải được phát triển như những phần của cùng một hệ thống. Nếu xây nhà máy xử lý nước thải mà mạng lưới thu gom chưa hoàn chỉnh, hiệu quả đầu tư sẽ bị hạn chế. Tương tự, tăng năng lực cấp nước nhưng chưa bảo vệ được nguồn nước hoặc chưa cải thiện mạng lưới phân phối thì vẫn khó bảo đảm cấp nước an toàn, ổn định. Bên cạnh vốn xây dựng, cần bố trí đủ nguồn lực cho vận hành, bảo trì và nâng cấp trong suốt vòng đời công trình. Bên cạnh đó là những hạn chế về dữ liệu và cơ chế phối hợp. Quy hoạch cần dựa trên quan trắc và dự báo đáng tin cậy; trách nhiệm giữa các đơn vị và địa phương phải rõ ràng.

Vì vậy, theo tôi, cần cách tiếp cận tổng thể và hệ thống, đặt hạ tầng nước trong mối quan hệ động học (dynamic system) với lưu vực và sự phát triển của đô thị. Từ quy hoạch đến đầu tư và vận hành, bảo vệ nguồn nước, gìn giữ không gian cho nước và kiểm soát rủi ro cần được gắn kết xuyên suốt. Trên nền tảng ấy, công nghệ tiên tiến cùng cơ chế quản lý và phối hợp hiệu quả mới có thể tạo nên một hệ thống nước đô thị an toàn, có khả năng chống chịu và đáp ứng nhu cầu phát triển lâu dài.

Các dự án hạ tầng cấp thoát nước và xử lý nước thải thường đòi hỏi vốn đầu tư lớn, trong khi thời gian thu hồi vốn dài và hiệu quả tài chính trực tiếp không cao. Việt Nam cần thay đổi cơ chế, chính sách như thế nào để thu hút mạnh hơn nguồn lực xã hội và khu vực tư nhân đầu tư vào lĩnh vực này?

- Bài toán lớn nhất, theo tôi, không chỉ là làm thế nào để thu hút được vốn, mà quan trọng hơn là làm sao để nguồn vốn đó tạo ra một dịch vụ nước có thể duy trì ổn định và lâu dài. Nhà đầu tư cần nhìn thấy một phương án cung cấp dịch vụ với trách nhiệm rõ ràng, những rủi ro chính được nhận diện và có cách kiểm soát phù hợp. Trong khi đó, hạ tầng nước phục vụ lợi ích cộng đồng, nên cơ chế thu hút vốn cũng cần đi cùng với việc bảo đảm người dân có thể tiếp cận dịch vụ với chi phí hợp lý. Muốn làm được điều đó, trước hết cần giải quyết hài hòa bài toán chi phí và giá dịch vụ. Các khoản chi hợp lý trong suốt vòng đời công trình, từ đầu tư, vận hành, bảo trì đến thay thế thiết bị, cần được tính toán và minh bạch. Giá nước, giá dịch vụ thoát nước và xử lý nước thải cũng cần có lộ trình điều chỉnh phù hợp, gắn với chất lượng dịch vụ. Với những nhóm người dân còn khó khăn, có thể thiết kế cơ chế hỗ trợ phù hợp, minh bạch, để vừa bảo đảm an sinh, vừa không làm thiếu hụt nguồn lực cần thiết cho vận hành hệ thống.

Một vấn đề khác là phân bổ rủi ro trong các dự án hợp tác công tư. Theo tôi, nguyên tắc nên là, rủi ro nào, bên nào có khả năng kiểm soát tốt hơn thì bên đó chịu trách nhiệm chính. Nhà nước có vai trò quan trọng trong quy hoạch, mặt bằng và bảo vệ nguồn nước; doanh nghiệp tập trung vào thiết kế, tổ chức vận hành và bảo đảm các chỉ tiêu dịch vụ đã cam kết. Các cơ chế chia sẻ rủi ro, thanh toán hay hỗ trợ đầu tư cũng cần được thiết kế rõ ràng, phù hợp với pháp luật và khả năng ngân sách.

Khi lựa chọn dự án, chúng ta cũng không nên chỉ nhìn vào chi phí xây dựng ban đầu. Điều quan trọng hơn là phải tính đến toàn bộ vòng đời công trình, từ chi phí vận hành, mức tiêu thụ năng lượng, tài nguyên đến độ tin cậy và khả năng đáp ứng các yêu cầu về môi trường.

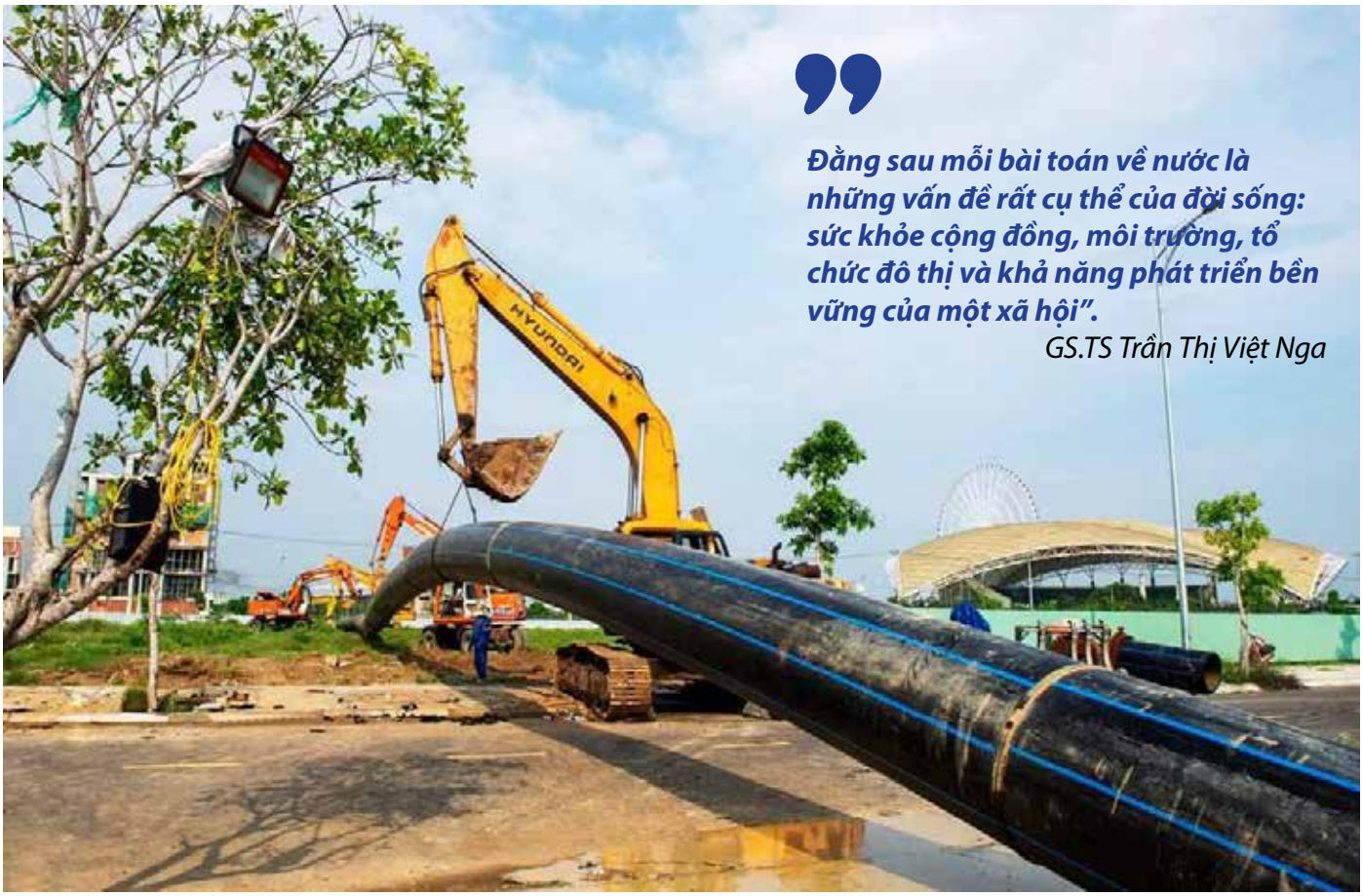
TÁI TẠO TÀI NGUYÊN NƯỚC THẢI

Bà có nhiều nghiên cứu về các công nghệ xử lý nước tiên tiến, trong đó có màng lọc sinh học kỵ khí (AnMBR) và các giải pháp xử lý nước thải tại chỗ. Từ thực tế nghiên cứu và triển khai, bà nhìn nhận đâu là những ưu thế khiến các công nghệ này phù hợp với điều kiện Việt Nam?

- AnMBR là một công nghệ tiên tiến ứng dụng quá trình sinh học trong điều kiện kỵ khí để xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ, kết hợp màng vi lọc đóng vai trò phân tách sinh khối và nước, và màng lọc cũng đóng vai trò duy trì được mật độ sinh khối lớn để hỗ trợ nâng cao hiệu quả của quá trình sinh học. Công nghệ này có hiệu quả xử lý cao, lợi thế về năng lượng, cho phép thu hồi vật chất có ích từ dòng nước thải như khí sinh học có thể dùng làm nguồn năng lượng tái tạo hay tái sử dụng nước sau xử lý. Cách tiếp cận này làm thay đổi quan niệm trước đây, khi công trình xử lý nước thải chỉ được nhìn nhận như một công trình "xử lý ô nhiễm". Theo hướng mới, mục tiêu được nâng lên thành "công trình tái tạo - thu hồi tài nguyên", mang lại nhiều giá trị hơn cho xã hội và môi trường.

Nhóm nghiên cứu đã thử nghiệm và bước đầu triển khai ứng dụng AnMBR tại một số trạm xử lý nước thải sinh hoạt, cơ sở chế biến gia súc và trang trại chăn nuôi lợn. Hiện nay, chúng tôi tiếp tục quan tâm đến việc nội địa hóa thiết bị, giảm chi phí và nâng khả năng ứng dụng trong thực tế.

Tất nhiên, tôi không nghĩ có một công nghệ nào phù hợp với mọi loại nước thải. Với từng nguồn thải và yêu cầu đầu ra



Đằng sau mỗi bài toán về nước là những vấn đề rất cụ thể của đời sống: sức khỏe cộng đồng, môi trường, tổ chức đô thị và khả năng phát triển bền vững của một xã hội".

GS.TS Trần Thị Việt Nga

khác nhau, công nghệ có thể cần được kết hợp với những công đoạn khác để xử lý nitơ, phốt pho hoặc kiểm soát vi sinh. Những vấn đề như tắc nghẽn màng, khả năng vận hành ổn định hay hiệu quả thu hồi khí sinh học cần được nghiên cứu kỹ càng.

Có thể nói AnMBR kết hợp xử lý sinh học kỵ khí với lọc màng là công nghệ có hiệu quả xử lý cao, tiết kiệm diện tích, có tiềm năng thu hồi năng lượng và các chất có ích từ dòng thải, cũng như tái sử dụng nước sau xử lý. Những ưu điểm này mở ra cơ hội ứng dụng tại các đô thị nơi có quỹ đất hạn chế và yêu cầu xả thải cao, góp phần phát triển và quản lý hệ thống nước đô thị theo hướng tuần hoàn.

Nhưng từ một kết quả nghiên cứu đến một công nghệ có thể vận hành ổn định ngoài thực tế vẫn còn một khoảng cách khá lớn, thưa bà?

- Đúng vậy! Từ một kết quả nghiên cứu tốt trong phòng thí nghiệm đến một công nghệ có thể vận hành ổn định ngoài thực tế vẫn là một chặng đường dài.

Khi ra thực tế, công nghệ phải thích ứng với biến động của các điều kiện môi trường như sự thay đổi theo mùa của nguồn nước, tải lượng ô nhiễm và điều kiện vận hành. Vì thế, thử nghiệm ở quy mô pilot và tại hiện trường là bước cần thiết để kiểm chứng cả hiệu quả, độ bền và chi phí.

Một bước rất quan trọng nữa là chuẩn hóa công nghệ sau quá trình thử nghiệm. Từ kết quả thực tế cần xây dựng được quy trình thiết kế, vận hành, bảo trì, nghiệm thu và đánh giá hiệu quả phù hợp. Khi những yêu cầu này được chuẩn hóa, doanh nghiệp và đơn vị sử dụng mới có cơ sở để tiếp nhận công nghệ, còn cơ quan quản lý cũng có căn cứ để đánh giá và nhân rộng.

Đây không chỉ là câu chuyện của riêng của nhà khoa học. Để rút ngắn khoảng cách từ nghiên cứu đến ứng dụng, cần có sự tham gia của nhà khoa học, doanh nghiệp, đơn vị quản lý và cơ sở sử dụng công nghệ ngay từ quá trình thử nghiệm. Mỗi bên cùng tham gia từ sớm thì công nghệ sẽ có nhiều cơ hội được hoàn thiện theo đúng nhu cầu thực tế.

Trong tinh thần Nghị quyết số 57-NQ/TW của Bộ Chính trị, khi khoa học, công nghệ và đổi mới sáng tạo được xác định là động lực quan trọng cho phát triển, cơ chế thử nghiệm có kiểm soát, thường được gọi là sandbox, là một hướng đáng quan tâm. Với những công nghệ mới trong lĩnh vực nước và môi trường, đây có thể là không gian để kiểm chứng đồng thời hiệu quả kỹ thuật, chi phí, khả năng vận hành và những yêu cầu quản lý trước khi xem xét nhân rộng.

Khái niệm "kinh tế tuần hoàn ngành nước" đang ngày càng được quan tâm. Từ góc nhìn của bà, nước thải có thể được nhìn nhận như một nguồn tài nguyên thế nào, thông qua tái sử dụng nước, thu hồi năng lượng hay các nguồn tài nguyên khác?

> ***Câu chuyện của ngành nước không còn là câu chuyện của một công trình đơn lẻ, mà trở thành câu chuyện về cách chúng ta tổ chức và vận hành cả một đô thị".***
>
> *GS.TS Trần Thị Việt Nga*

- Có thể hiểu, kinh tế tuần hoàn trong ngành nước là sử dụng hiệu quả các nguồn tài nguyên trong suốt quá trình khai thác, sử dụng, xử lý và tái sử dụng. Với cách nhìn này, nước thải không chỉ là thứ cần xử lý để đảm bảo an toàn cho môi trường và con người, mà còn chứa những nguồn tài nguyên có thể thu hồi nếu được tiếp cận bằng công nghệ và phương thức quản lý phù hợp.

Trước hết, một hướng có tính thực tiễn là tái sử dụng nước sau xử lý cho các nhu cầu phi sinh hoạt, như tưới cây xanh, rửa đường, xả bồn cầu hoặc phục vụ một số công đoạn sản xuất công nghiệp. Tuy nhiên, mỗi mục đích đều có yêu cầu riêng về chất lượng nước và kiểm soát rủi ro. Nước đạt yêu cầu xả thải chưa chắc đã phù hợp để tái sử dụng, vì vậy, cần xác định rõ nhu cầu và kiểm soát chất lượng trong suốt quá trình từ xử lý đến sử dụng lại.

Nước thải còn chứa năng lượng và những thành phần vật chất có giá trị. Chẳng hạn, với các dòng thải giàu chất hữu cơ, công nghệ xử lý kỵ khí có thể tạo ra khí sinh học để phát điện hoặc cung cấp nhiệt. Nitơ, phốt pho và một số hợp chất hữu cơ cũng có thể được nghiên cứu thu hồi để làm nguyên liệu cho các mục đích khác. Dù vậy, thu hồi được về mặt kỹ thuật chưa có nghĩa là đã hiệu quả về kinh tế. Chúng ta còn phải tính đến độ tinh sạch, mức độ an toàn, nhu cầu thị trường và chi phí vận hành của toàn bộ quá trình.

Với các khu đô thị mới, tôi cho rằng có thể chủ động hơn bằng cách tính toán mô hình tuần hoàn ngay từ khâu quy hoạch. Chẳng hạn, thiết kế mạng cấp nước tái sử dụng riêng cho những nhu cầu phù hợp hoặc tổ chức thu gom riêng nước xám và nước đen ngay từ đầu. Đây là những phương án khác nhau, có yêu cầu kỹ thuật và quản lý riêng, nên cần được lựa chọn dựa trên điều kiện thực tế của từng khu đô thị.

Theo tôi, lộ trình triển khai nên bắt đầu từ nhu cầu thực tế, quy mô phù hợp và phân định rõ trách nhiệm vận hành. Việc ưu tiên các mục đích đơn giản, dễ kiểm soát như tưới cảnh quan sẽ tạo tiền đề để mở rộng khi tích lũy đủ dữ liệu và kinh nghiệm. Khi nước thải được tái sử dụng, năng lượng được thu hồi và vật chất có ích được đưa trở lại chu trình sản xuất, nhà máy xử lý nước thải sẽ chuyển mình từ đơn vị xử lý chất thải thành trung tâm cung cấp tài nguyên đô thị. Đây chính là chìa khóa hiện thực hóa kinh tế tuần hoàn ngành nước, giúp tiết kiệm tài nguyên và giảm tải áp lực môi trường.

HẠ TẦNG NƯỚC THÍCH ỨNG VÀ PHỤC HỒI

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và biến đổi khí hậu ngày càng tác động rõ rệt đến các đô thị, theo bà, chúng ta cần thay đổi cách quy hoạch và đầu tư hạ tầng nước như thế nào để các đô thị Việt Nam có khả năng thích ứng tốt hơn với những kịch bản trong tương lai?

- Theo tôi, trước hết chúng ta cần thay đổi cách nhìn về hạ tầng nước. Thay vì chỉ tìm cách "chống lại" thiên nhiên bằng những công trình cứng, cần hướng tới cách tiếp cận linh hoạt hơn, đó là "sống chung, thích ứng và chủ động" trước những biến động ngày càng khó dự báo.

Điều này cần được tính đến ngay từ khâu quy hoạch và quyết định đầu tư. Hạ tầng nước thường có tuổi thọ hàng chục năm, trong khi khí hậu, sử dụng đất và nhu cầu của đô thị có thể thay đổi rất nhanh. Nếu chỉ thiết kế dựa trên điều kiện hiện tại, công trình có thể không còn phù hợp khi những điều kiện đó thay đổi.

Dữ liệu lịch sử rất cần thiết, nhưng có lẽ không nên chỉ nhìn vào những gì đã xảy ra để hình dung tương lai. Chúng ta cần kết hợp dữ liệu hiện có với các kịch bản về mưa lớn, triều, hạn hán, xâm nhập mặn và quá trình phát triển đô thị.

Thực tế cũng cho thấy, các vấn đề về nước trong đô thị ngày càng gắn với nhau và khó có thể giải quyết bằng từng công trình riêng lẻ. Cách tiếp cận đó cho thấy quy hoạch hạ tầng nước cần được nhìn ở quy mô toàn hệ thống, trong đó, các giải pháp phải hỗ trợ và bổ sung cho nhau.

Từ những kịch bản và mối liên hệ đó, chúng ta mới có thể nhận diện rõ đâu là điểm dễ tổn thương, đâu là dịch vụ thiết yếu cần được ưu tiên bảo vệ và đầu tư ở mức nào. Tôi nghĩ, đây cũng là bước chuyển quan trọng từ tư duy "xây công trình để chống ngập" sang tư duy xây dựng một hệ thống hạ tầng nước có khả năng thích ứng và phục hồi trước những thay đổi của tương lai.

Vậy khi đã nhận diện được những rủi ro đó, cách tiếp cận về giải pháp hạ tầng nên thay đổi như thế nào?

- Tôi cho rằng không nên đặt công trình kỹ thuật và các giải pháp dựa vào tự nhiên ở hai phía đối lập. Cống, trạm bơm, hồ điều hòa vẫn rất cần thiết, nhưng cần kết hợp với việc giữ không gian cho nước thông qua mặt thấm, cây xanh, vùng trữ nước tạm thời và bảo vệ các hành lang thoát nước. Mỗi giải pháp phải được lựa chọn trên cơ sở điều kiện cụ thể về địa chất, nước ngầm, chất lượng nước và khả năng vận hành, bảo trì.

Một điểm nữa là đầu tư hạ tầng cần có độ mở cho tương lai. Thay vì cố dự báo chính xác mọi nhu cầu trong vài chục năm tới, có thể dành quỹ đất cho khả năng mở rộng hoặc sử dụng các mô-đun có thể bổ sung theo từng giai đoạn. Với hệ thống cấp nước cũng vậy, cần tính đến nguồn dự phòng, khả năng kết nối giữa các khu vực và phương án ứng phó khi chất lượng nước nguồn biến động.

GS.TS Trần Thị Việt Nga sinh năm 1974, quê quán Nghệ An. Bà là nữ Giáo sư được trao Giải thưởng Kovalevskaia năm 2025.

Tốt nghiệp ngành Cấp thoát nước - Môi trường nước tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội năm 1996; Thạc sĩ Kỹ thuật nước thải tại Viện Công nghệ Châu Á (AIT), Thái Lan năm 1999; Tiến sĩ Kỹ thuật Môi trường đô thị tại Đại học Tokyo, Nhật Bản năm 2002; Nghiên cứu sau tiến sĩ (Postdoc) về Môi trường và Phát triển bền vững tại - Trường Đại học Liên Hợp Quốc, Nhật Bản (2003 - 2005).

Sau khi tốt nghiệp đại học, bà công tác tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, là giảng viên Bộ môn Cấp thoát nước, Khoa Kỹ thuật môi trường. Năm 2015, bà được công nhận chức danh PGS và năm 2024 được công nhận chức danh GS liên ngành Xây dựng - Kiến trúc. Bà là Trưởng khoa Kỹ thuật Môi trường (2015-2025) và hiện là Viện trưởng Viện Công nghệ cao Việt - Nhật, giảng viên cao cấp Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Một trong những hướng nghiên cứu nổi bật của bà là phát triển công nghệ Màng lọc sinh học kỵ khí (AnMBR) xử lý nước thải. Hiện bà chủ trì dự án quốc tế SATREPS về hệ thống cấp nước thích ứng với nguồn nước ô nhiễm tại Việt Nam (2023-2028) do JICA-JST (Nhật Bản) tài trợ.

Công nghệ số sẽ ngày càng đóng vai trò quan trọng trong quan trắc, dự báo và điều hành. Nhưng công nghệ chỉ thực sự có giá trị khi đi cùng dữ liệu đủ tin cậy và năng lực của người vận hành. Một hệ thống cảnh báo sẽ không có nhiều ý nghĩa nếu cảnh báo không dẫn tới một hành động cụ thể.

Vì vậy, với tôi, một hệ thống hạ tầng có khả năng thích ứng không nhất thiết là hệ thống không bao giờ xảy ra sự cố. Điều quan trọng là khi sự cố xảy ra, hệ thống vẫn duy trì được những dịch vụ thiết yếu, hạn chế thiệt hại và có khả năng phục hồi trong thời gian hợp lý. Đó mới là thước đo thực chất của một hạ tầng nước có khả năng chống chịu trong bối cảnh biến đổi khí hậu và đô thị hóa ngày càng nhanh.

Nhân ngày Phụ nữ Việt Nam 20/10, xin được chúc mừng bà về Giải thưởng Kovalevskaia năm 2025 - một dấu mốc đáng nhớ trong hành trình nghiên cứu của bà. Nhìn lại chặng đường đã qua, bà muốn chia sẻ điều gì với những phụ nữ đang theo đuổi khoa học, kỹ thuật, đặc biệt là các nữ trí thức trẻ đang bắt đầu hành trình của mình?

- Tôi xin cảm ơn lời chúc mừng và tình cảm của các bạn. Giải thưởng Kovalevskaia là một sự ghi nhận rất đáng quý đối với tôi, nhưng hơn cả một giải thưởng, đó còn là dịp để tôi nhìn lại hành trình mình đã đi qua và nhớ đến những người đã âm thầm đồng hành trong suốt chặng đường ấy. Đó là sự dìu dắt của thầy cô, sự đồng nghiệp, cộng sự và đặc biệt là sự sẻ chia của gia đình. Tôi luôn trân trọng và biết ơn điều đó.

Với các bạn trẻ, đặc biệt là các bạn nữ đang lựa chọn con đường khoa học, tôi chỉ muốn nói rằng nếu thực sự yêu thích và tin vào điều mình theo đuổi, hãy cho bản thân cơ hội được thử sức, được đi xa và cả được thất bại. Khoa học là một hành trình dài hạn, nơi sự kiên trì đôi khi còn quyết định chiến thắng nhiều hơn tài năng. Và để một người phụ nữ có thể vững bước đi trọn chặng đường ấy, nội lực thôi là chưa đủ - cô ấy cần một mái ấm biết sẻ chia, những đồng nghiệp biết nâng đỡ và một môi trường làm việc trân trọng sự khác biệt.

Tôi vẫn nghĩ, làm khoa học cũng giống như quản trị một dòng sông. Có những đoạn dòng chảy mạnh mẽ, có những đoạn quanh co, có lúc tưởng như bị chặn lại bởi những ghềnh đá. Nhưng dòng sông vẫn tìm cách đi về phía trước. Khoa học cũng vậy, có thể có những lúc chúng ta mệt mỏi, hoài nghi hoặc chưa nhìn thấy kết quả, nhưng nếu còn giữ được sự tò mò, lòng kiên nhẫn và tình yêu với công việc, chúng ta vẫn còn lý do để tiếp tục.

Tôi mong những người phụ nữ làm khoa học hôm nay không phải lựa chọn giữa đam mê và gia đình, giữa sự nghiệp và những giá trị riêng của mình, mà có thể tìm được cách để những điều ấy cùng nâng đỡ nhau. Và tôi mong thế hệ trẻ, dù đi trên con đường nào, cũng giữ cho mình một niềm tin rằng những đóng góp nhỏ bé, nếu được làm bằng sự tử tế, bền bỉ và trách nhiệm, rồi sẽ tạo nên một dòng chảy lớn.

Bởi cuối cùng, điều đẹp nhất của khoa học, có lẽ không chỉ là một giải thưởng hay một công trình được ghi tên, mà là những gì chúng ta để lại cho người đi sau: Một con đường rộng hơn, một niềm tin lớn hơn và thêm một lý do để họ dám bước tiếp.

Trân trọng cảm ơn bà về cuộc trò chuyện đầy thú vị này!

Lựa chọn vật liệu nội thất theo cách tiếp cận vòng đời hướng tới phát thải thấp trong công trình xây dựng

PGS.TS.KTS HOÀNG MẠNH NGUYÊN

NCV TRẦN PHƯƠNG ANH

Lựa chọn vật liệu nội thất theo cách tiếp cận vòng đời là một giải pháp quan trọng nhằm giảm tác động môi trường và hướng tới các công trình phát thải thấp. Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu kết hợp phân tích - tổng hợp và đối chiếu để hệ thống hóa các yếu tố ảnh hưởng đến lựa chọn vật liệu trong toàn bộ vòng đời. Kết quả đề xuất khung 4+1, gồm 4 phương diện: (1) nguồn gốc và tác động môi trường; (2) sức khỏe và chất lượng môi trường trong nhà; (3) độ bền, bảo trì và tuổi thọ; (4) thu hồi, tái sử dụng và tuần hoàn; cùng lớp thông tin kiểm chứng xuyên suốt. Khung 4+1 tích hợp các yêu cầu thường được xem xét riêng rẽ, đồng thời làm rõ các mối quan hệ đánh đổi giữa các tiêu chí, qua đó tạo cơ sở cho lựa chọn vật liệu theo chức năng, điều kiện sử dụng và vòng đời. Kết quả cung cấp một cấu trúc tham chiếu để chuyển hóa các định hướng về tăng trưởng xanh, kinh tế tuần hoàn và giảm phát thải thành cơ sở ra quyết định vật liệu ở cấp thiết kế.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu và yêu cầu giảm phát thải carbon đang thúc đẩy ngành Xây dựng chuyển dịch từ cách tiếp cận tập trung vào hiệu quả năng lượng trong giai đoạn vận hành sang đánh giá tác động môi trường trên toàn bộ vòng đời công trình. Việt Nam đã thể hiện cam kết mạnh mẽ về tăng trưởng xanh, phát triển bền vững và giảm phát thải khí nhà kính, trong đó mục tiêu đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 đặt ra yêu cầu ngày càng rõ đối với việc giảm phát thải từ xây dựng, vật liệu và quá trình sử dụng công trình. Cùng với đó, các định hướng về kinh tế tuần hoàn, sử dụng hiệu quả tài nguyên và tăng cường sử dụng vật liệu thân thiện với môi trường đang tạo động lực cho việc thay đổi phương thức thiết kế, lựa chọn và sử dụng vật liệu trong công trình.

Trong xu hướng đó, công trình xanh không chỉ được đánh giá thông qua hiệu quả năng lượng và sử dụng nước mà ngày càng quan tâm đến vật liệu, chất lượng môi trường trong nhà, sức khỏe người sử dụng, quản lý chất thải và các tác động môi trường trong toàn bộ vòng đời. Nội thất là một thành phần quan trọng nhưng đôi khi chưa được xem xét tương xứng trong đánh giá công trình xanh. Các bộ tiêu chí công trình xanh trên thế giới đều dành sự quan tâm nhất định đến vật liệu hoàn thiện và nội thất thông qua những yêu cầu liên quan đến nguồn gốc tài nguyên, hàm lượng tái chế, phát thải carbon, khả năng tái sử dụng, quản lý chất thải, độ bền cũng như phát thải các chất gây ô nhiễm trong nhà. Điều này cho thấy vật liệu nội thất không chỉ là vấn đề của thiết kế thẩm mỹ và công năng, mà còn là một cấu phần của hiệu quả môi trường và sức khỏe của người sử dụng trong công trình.

Đối với các công trình sử dụng vốn ngân sách nhà nước, đặc biệt là những công trình có tính chất quan trọng, đặc thù hoặc liên quan đến yêu cầu bảo mật và an ninh quốc gia, việc lựa chọn vật liệu nội thất còn đặt ra những yêu cầu riêng. Bên cạnh các tiêu chí về kỹ thuật, độ bền, an toàn và hiệu quả đầu tư, cần xem xét khả năng kiểm soát nguồn gốc vật liệu, tính minh bạch của thông tin môi trường, mức phát thải, khả năng thay thế và bảo trì trong dài hạn. Trong những trường hợp này, việc áp dụng trực tiếp các tiêu chí hoặc chứng nhận của thị trường có thể chưa đủ để đáp ứng yêu cầu quản lý, đặc biệt khi cần bảo đảm tính thống nhất, khả năng kiểm chứng và phù hợp với điều kiện, quy định của Việt Nam.

Một vấn đề quan trọng vì vậy là sự cần thiết xây dựng và ban hành một bộ tiêu chí và tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam, trong đó nội thất và vật liệu nội thất cần được xác định như một hợp phần có tiêu chí đánh giá rõ ràng. Một hệ thống tiêu chí thống nhất không chỉ hỗ trợ đánh giá mức độ xanh của công trình mà còn tạo cơ sở cho chủ đầu tư, tư vấn thiết kế, nhà thầu và cơ quan quản lý

trong việc lựa chọn vật liệu, kiểm soát chất lượng và đánh giá hiệu quả môi trường của các giải pháp thiết kế. Đặc biệt, đối với các công trình sử dụng vốn ngân sách hoặc công trình có yêu cầu đặc thù, hệ thống tiêu chí trong nước có thể tạo cơ sở kiểm soát phù hợp mà không nhất thiết phụ thuộc hoàn toàn vào các hệ thống chứng nhận quốc tế.

Tuy nhiên, việc lựa chọn một vật liệu "xanh" không thể chỉ dựa trên một thuộc tính riêng lẻ như nguồn gốc tự nhiên, hàm lượng tái chế, khả năng tái tạo hay một chứng nhận môi trường. Tác động của vật liệu còn phụ thuộc vào quá trình khai thác nguyên liệu, sản xuất, vận chuyển, lắp đặt, sử dụng, bảo trì, thay thế và xử lý cuối vòng đời. Một vật liệu có ưu thế ở một giai đoạn có thể tạo ra tác động lớn hơn ở một giai đoạn khác. Do đó, đánh giá vật liệu cần chuyển từ cách tiếp cận đơn thuộc tính sang tư duy vòng đời (Life Cycle Thinking), qua đó xem xét đồng thời các tác động môi trường, sử dụng tài nguyên, phát thải carbon, sức khỏe con người, độ bền và khả năng tuần hoàn của vật liệu.

Đối với mục tiêu phát triển các công trình phát thải thấp, cách tiếp cận này đặc biệt có ý nghĩa khi hiệu quả năng lượng vận hành của công trình ngày càng được cải thiện, trong khi phát thải "hàm chứa" trong vật liệu có xu hướng trở thành một thành phần đáng kể của tổng phát thải vòng đời. Việc lựa chọn vật liệu nội thất vì vậy cần được đặt trong mối quan hệ giữa carbon hàm chứa - tài nguyên - sức khỏe và chất lượng môi trường trong nhà - độ bền - tính tuần hoàn - chi phí vòng đời và điều kiện cung ứng tại địa phương.

Từ góc độ ra quyết định, đây là một bài toán đa tiêu chí, trong đó các yếu tố môi trường, kỹ thuật, kinh tế và xã hội có thể tồn tại những mối quan hệ đánh đổi. Cần có một phương pháp cho phép chuyển các thông tin đa dạng về vật liệu thành những tiêu chí có thể đo lường, so sánh và kiểm chứng ở cấp thiết kế. Đây cũng là cơ sở để kết nối các mục tiêu ở cấp chính sách với những quyết định cụ thể trong thiết kế và đầu tư xây dựng.

Kết quả nghiên cứu trong bài viết hướng tới việc cung cấp cơ sở khoa học cho quá trình lựa chọn vật liệu nội thất, đồng thời góp phần hình thành cơ sở tham khảo cho việc xây dựng các tiêu chí và tiêu chuẩn đánh giá công trình xanh phù hợp với điều kiện Việt Nam, đặc biệt đối với các công trình sử dụng vốn ngân sách và các công trình có yêu cầu quản lý, bảo mật đặc thù.

CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP TIẾP CẬN

Nghiên cứu được xây dựng trên ba cơ sở khoa học chính gồm tư duy vòng đời, mối quan hệ giữa vật liệu với sức khỏe người sử dụng và tính tuần hoàn của sản phẩm - vật liệu. Ba cơ sở này cho phép xem xét lựa chọn vật liệu không chỉ như một quyết định kỹ thuật riêng lẻ mà trong mối quan hệ với tác động môi trường, điều kiện sử dụng và khả năng duy trì giá trị của tài nguyên trong toàn bộ vòng đời.

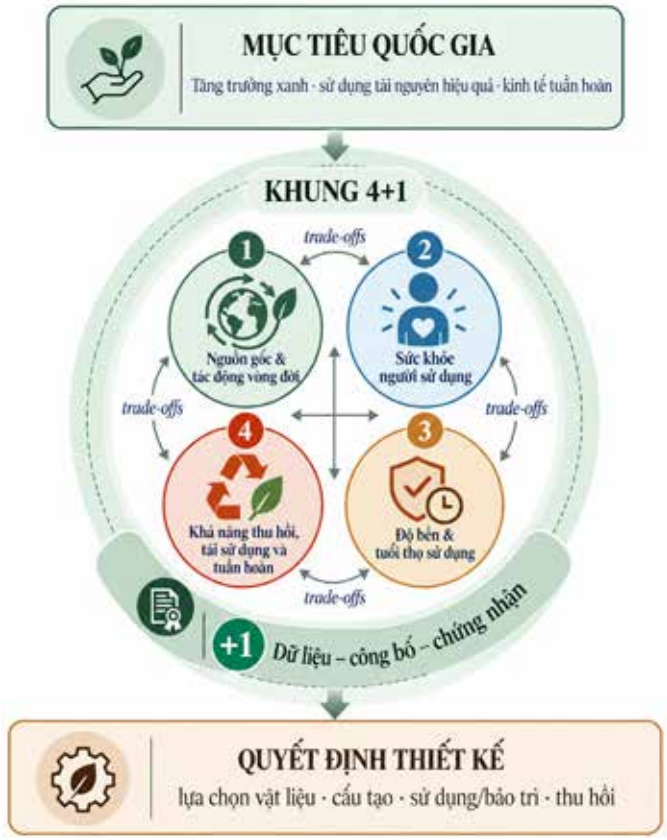
Tư duy vòng đời (Life Cycle Thinking) xem xét tác động của sản phẩm xuyên suốt các giai đoạn từ nguyên liệu, sản xuất, phân phối và sử dụng đến bảo trì, thu hồi hoặc xử lý cuối vòng đời (UNEP ,2004; ISO, 2006). Cách tiếp cận này giúp hạn chế việc tối ưu một giai đoạn nhưng làm gia tăng tác động ở giai đoạn khác, đồng thời tạo cơ sở cho việc đánh giá vật liệu theo toàn bộ quá trình sử dụng thay vì một đặc tính riêng lẻ.

Sức khỏe người sử dụng và chất lượng môi trường trong nhà là một phương diện đặc thù của vật liệu nội thất do vật liệu hoàn thiện, đồ nội thất, sơn, keo, lớp phủ và sản phẩm dệt tồn tại trực tiếp trong không gian sử dụng. Một số sản phẩm có thể phát thải formaldehyde và các hợp chất hữu cơ bay hơi (Volatile Organic Compounds - VOC), vì vậy việc lựa chọn vật liệu cần xem xét cả tác động trong giai đoạn sử dụng, không chỉ tác động phát sinh trong sản xuất (WHO, 2010).

Tính tuần hoàn của sản phẩm và vật liệu (circularity) nhấn mạnh việc duy trì giá trị của sản phẩm, cấu kiện và vật liệu trong thời gian dài thông qua kéo dài tuổi thọ, bảo trì, sửa chữa, tái sử dụng, thu hồi và tái chế. Theo đó, khả năng thu hồi và tiếp tục sử dụng vật liệu sau khi kết thúc một vòng sử dụng cần được xem xét ngay từ quá trình thiết kế (ISO,2024).

Ba cơ sở trên tạo nền tảng để hình thành các phương diện xem xét trong lựa chọn vật liệu nội thất, qua đó liên hệ các yêu cầu về tác động môi trường, sức khỏe người sử dụng, tuổi thọ sử dụng và khả năng tuần hoàn với quyết định ở cấp thiết kế.

Ở khía cạnh pháp lý, định hướng sử dụng tài nguyên và vật liệu theo hướng bền vững được đặt trong các chính sách về tăng trưởng xanh, bảo vệ môi trường và kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam. Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050 và Đề án phát triển kinh tế tuần hoàn ở Việt Nam đều nhấn mạnh yêu cầu sử dụng hiệu quả tài



Hình 1. Khung 4+1 liên hệ mục tiêu quốc gia với quyết định lựa chọn vật liệu ở cấp thiết kế. Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Hình 2. Ví dụ giả định về tuổi thọ và chu kỳ thay thế vật liệu. Nguồn: Tác giả minh hoạ

nguyên, giảm chất thải và thúc đẩy các mô hình sản xuất - tiêu dùng theo hướng tuần hoàn (Thủ tướng Chính phủ, 2021; 2022). Luật Bảo vệ môi trường, tại Điều 142 về kinh tế tuần hoàn, xác định yêu cầu giảm khai thác nguyên liệu, vật liệu, kéo dài vòng đời sản phẩm, hạn chế chất thải phát sinh và nâng cao mức độ tái sử dụng, tái chế từ giai đoạn thiết kế, sản xuất và phân phối (Văn phòng Quốc hội, 2026). Trong lĩnh vực vật liệu xây dựng, Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050 và Nghị định số 209/2026/NĐ-CP về quản lý vật liệu xây dựng tiếp tục cụ thể hóa các yêu cầu về sử dụng hiệu quả tài nguyên, phát triển vật liệu mới, vật liệu tái chế, vật liệu xanh và giảm tác động môi trường trong quá trình sản xuất, sử dụng vật liệu (Thủ tướng Chính phủ, 2020; Chính phủ, 2026). Các văn bản trên tạo cơ sở pháp lý và định hướng chính sách ở cấp quốc gia và cấp ngành; đồng thời đặt ra yêu cầu tiếp tục chuyển hóa các mục tiêu này thành những cân nhắc cụ thể trong lựa chọn vật liệu ở cấp dự án và thiết kế. Phạm vi áp dụng đối với từng sản phẩm nội thất cần được xác định theo quy định chuyên ngành tương ứng.

Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong bài báo là tổng quan tài liệu kết hợp phân tích, tổng hợp và đối chiếu, thực hiện qua ba bước. Thu thập và sàng lọc tài liệu: khai thác các nghiên cứu khoa học, tiêu chuẩn, tài liệu kỹ thuật, tài liệu quốc tế và văn bản pháp lý, chính sách của Việt Nam liên quan đến tư duy vòng đời, sức khỏe người sử dụng, tuổi thọ, tính tuần hoàn và lựa chọn vật liệu. Phân tích và tổng hợp: hệ thống hóa các yếu tố ảnh hưởng đến lựa chọn vật liệu nội thất, từ đó phân nhóm thành các phương diện đánh giá và thông tin kiểm chứng. Đối chiếu: đối chiếu khả năng cung cấp và kiểm chứng thông tin của dữ liệu kỹ thuật, công bố môi trường, nhãn sinh thái và chứng nhận chuyên biệt; đồng thời đối chiếu khung tiêu chí đề xuất với các định hướng quốc gia về tăng trưởng xanh, sử dụng hiệu quả tài nguyên và kinh tế tuần hoàn.

KHUNG LỰA CHỌN VẬT LIỆU NỘI THẤT THEO CÁCH TIẾP CẬN VÒNG ĐỜI

Trên cơ sở tổng hợp và đối chiếu tài liệu, nghiên cứu đề xuất khung lựa chọn vật liệu nội thất (khung 4+1) nhằm hỗ trợ chuyển các yêu cầu rộng hơn về môi trường, sức khỏe và sử dụng tài nguyên thành những cân nhắc cụ thể trong lựa chọn vật liệu nội thất. Khung gồm bốn phương diện chính: (1) nguồn gốc và tác động môi trường trong vòng đời; (2) sức khỏe người sử dụng và chất lượng môi trường trong nhà; (3) độ bền, bảo trì và kéo dài tuổi thọ sử dụng; và (4) khả năng thu hồi, tái sử dụng và tuần hoàn. Bên cạnh đó, dữ liệu kỹ thuật, công bố môi trường, nhãn sinh thái và chứng nhận tạo thành lớp thông tin kiểm chứng (+1) xuyên suốt quá trình lựa chọn. Khung 4+1 không nhằm xếp hạng vật liệu theo một thang điểm cố định mà cung cấp cấu trúc tham chiếu để nhà thiết kế xác định mức độ ưu tiên theo chức năng, điều kiện sử dụng và mục tiêu của từng dự án. Cấu trúc tổng hợp này được thể hiện tại Hình 1.

Nguồn gốc và tác động môi trường trong vòng đời

Nguồn nguyên liệu là một trong những yếu tố đầu tiên cần xem xét khi lựa chọn vật liệu nội thất theo hướng bền vững. Có thể xem xét các nguồn tái tạo như tre, mây, một số sợi thực vật; vật liệu tái sử dụng hoặc có thành phần tái chế như gỗ, kim loại, kính và vật liệu dệt; đồng thời cần quan tâm đến khả

Hình 3. Khả năng thu hồi, tái sử dụng và tuần hoàn. Nguồn: Tác giả minh hoạ.

năng truy xuất nguồn gốc. Đối với gỗ và sản phẩm từ rừng, FSC là một ví dụ về công cụ hỗ trợ kiểm chứng nguồn gốc và chuỗi hành trình sản phẩm, nhưng không đồng nghĩa với việc sản phẩm đã được đánh giá toàn diện về tính bền vững. (FSC International Center,2021)

Bên cạnh nguồn nguyên liệu, tác động môi trường còn phát sinh từ sản xuất, sử dụng năng lượng và nước, tỷ lệ phế phẩm, vận chuyển và các giai đoạn tiếp theo của vòng đời. Phương pháp đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment) (LCA, ISO 2006) và hình thức công bố sản phẩm môi trường (Environmental Product Declaration) (EPD, ISO, 2026) có thể cung cấp dữ liệu định lượng hỗ trợ quá trình lựa chọn khi các điều kiện đánh giá tương thích. Vì vậy, nguồn gốc "xanh" chỉ là điểm khởi đầu; vật liệu cần được xem xét trong mối quan hệ với tác động của toàn bộ vòng đời.

Từ đó, nguồn gốc vật liệu không nên được sử dụng như tiêu chí quyết định độc lập. Trong trường hợp các phương án cùng đáp ứng yêu cầu công năng, việc lựa chọn cần đối chiếu thêm dữ liệu về quá trình sản xuất, mức sử dụng tài nguyên, vận chuyển và tuổi thọ dự kiến. Đặc biệt, khoảng cách vận chuyển hoặc hàm lượng tái chế chỉ phản ánh một phần của tác động vòng đời; do đó, việc lựa chọn dựa trên dữ liệu đầy đủ hơn có ý nghĩa không chỉ đối với từng dự án mà còn đối với cách thức tài nguyên được khai thác và sử dụng trong chuỗi vật liệu.

Sức khoẻ người sử dụng và chất lượng môi trường trong nhà

Đối với vật liệu nội thất, tác động môi trường không phải là yếu tố duy nhất cần xem xét. Ván gỗ công nghiệp, sơn, keo, lớp phủ bề mặt, vật liệu dệt và đồ nội thất hiện diện trực tiếp trong không gian sử dụng và có thể phát thải các chất vào không khí trong nhà. Trong đó, formaldehyde và một số hợp chất hữu cơ bay hơi (VOC) là những yếu tố thường được quan tâm khi đánh giá chất lượng không khí trong nhà (Indoor Air Quality - IAQ).

Trong quá trình lựa chọn vật liệu không nên chỉ dựa vào thành phần nguyên liệu mà còn cần xem xét mức phát thải trong quá trình sử dụng. Chứng nhận GREENGUARD tập trung vào phát thải hóa chất của vật liệu xây dựng, vật liệu hoàn thiện và đồ nội thất (UL Standards & Engagement, 2022); do đó cung cấp một dạng thông tin khác với chứng nhận về nguồn gốc nguyên liệu. Vì vậy, tác động môi trường thấp ở giai đoạn sản xuất không đủ để khẳng định tính bền vững nếu vật liệu làm suy giảm chất lượng môi trường trong nhà trong quá trình sử dụng.

Trong thực tế lựa chọn, cần phân biệt giữa thành phần hóa học của sản phẩm và mức phát thải của sản phẩm trong điều kiện sử dụng. Hai thông tin này không hoàn toàn đồng nhất; do đó, các tuyên bố như "không chứa" hoặc "hàm lượng thấp" một thành phần nhất định chưa thay thế được dữ liệu phát thải khi mục tiêu là kiểm soát chất lượng không khí trong nhà. Với những không gian có thời gian lưu trú dài hoặc đối tượng sử dụng nhạy cảm, dữ liệu phát thải cần được xem xét ngay từ bước sàng lọc vật liệu. Khi được áp dụng nhất quán, yêu cầu này không chỉ góp phần kiểm soát một sản phẩm riêng lẻ mà còn hướng tới cải thiện chất lượng môi trường trong nhà và giảm nguy cơ phơi nhiễm đối với người sử dụng.

Độ bền, bảo trì và kéo dài tuổi thọ sử dụng

Tuổi thọ sử dụng là một yếu tố quan trọng khi xem xét tác

Bảng 1. Phạm vi thông tin hỗ trợ của một số công cụ, công bố và chứng nhận liên quan đến vật liệu nội thất. (Nguồn: Tác giả tổng hợp).

Công cụ	Bản chất	Thông tin hỗ trợ
FSC	Chứng nhận	Nguồn gốc và chuỗi hành trình sản phẩm từ rừng
GREENGUARD	Chứng nhận	Phát thải hóa chất trong môi trường trong nhà
EPD	Công bố môi trường	Dữ liệu tác động môi trường của sản phẩm
EU Ecolabel	Nhãn sinh thái	Các yêu cầu môi trường theo nhóm sản phẩm
Cradle to Cradle Certified	Chứng nhận đa tiêu chí	Sức khỏe vật liệu, tuần hoàn và các nhóm tiêu chí khác

động của vật liệu trong toàn bộ vòng đời (ISO,2011). Một vật liệu có tác động sản xuất ban đầu thấp nhưng phải thay thế nhiều lần chưa chắc tạo ra tổng tác động thấp hơn một vật liệu có tác động ban đầu cao hơn nhưng duy trì được lâu dài. Giả sử vật liệu A phải thay sau 5 năm trong khi vật liệu B có thể sử dụng 20 năm, số lần thay thế trở thành một biến số cần được tính đến. Ví dụ này không có nghĩa vật liệu B mặc nhiên bền vững hơn A, mà cho thấy tác động ban đầu cần được đặt trong tương quan với thời gian sử dụng thực tế.

Trong điều kiện sử dụng thực tế, độ bền phụ thuộc vào cả môi trường và cường độ khai thác: nhiệt độ, độ ẩm, nước, ánh sáng, ma sát, va đập, tải trọng và phương pháp vệ sinh đều có thể ảnh hưởng đến tốc độ suy giảm của vật liệu. Theo đó, tuổi thọ sử dụng không chỉ phụ thuộc vào bản thân vật liệu mà là kết quả của sự phù hợp giữa đặc tính vật liệu, vị trí sử dụng, cường độ khai thác và khả năng bảo trì. Vì vậy, mục tiêu không phải là lựa chọn vật liệu "bền nhất", mà là độ bền phù hợp với vị trí, chức năng và tuổi thọ dự kiến. Song song với đó, khả năng vệ sinh, bảo dưỡng, phục hồi bề mặt, sửa chữa và thay thế từng bộ phận giúp kéo dài thời gian sản phẩm tiếp tục đáp ứng yêu cầu sử dụng, qua đó hạn chế nhu cầu thay mới và giảm áp lực lên tài nguyên trong suốt vòng đời. (Hình 2)

Khả năng thu hồi, tái sử dụng và tuần hoàn

Khi kết thúc một vòng sử dụng, vật liệu có thể tiếp tục được duy trì giá trị thông qua thu hồi, tái sử dụng hoặc tái chế thay vì trở thành chất thải. Vì vậy, bên cạnh nguồn gốc, tác động môi trường và tuổi thọ sử dụng, khả năng thu hồi và tiếp tục tham gia vào các chu trình sử dụng sau đó cũng cần được xem xét trong quá trình lựa chọn vật liệu.

Khả năng thu hồi không chỉ phụ thuộc vào đặc tính của bản thân vật liệu mà còn chịu ảnh hưởng bởi cách vật liệu được kết hợp trong sản phẩm hoặc cấu kiện. Một vật liệu có khả năng tái sử dụng hoặc tái chế về mặt kỹ thuật vẫn có thể khó được thu hồi nếu bị dán, đổ liền hoặc liên kết chặt với các lớp vật liệu khác. Ngược lại, liên kết cơ học có thể tháo rời, cấu tạo mô-đun và khả năng thay thế từng bộ phận có thể hạn chế hư hỏng khi tháo dỡ và tạo điều kiện thu hồi vật liệu sau sử dụng. Thiết kế cho tháo rời (Design for Disassembly) vì vậy có thể được xem như một chiến lược hỗ trợ khả năng thu hồi và tuần hoàn vật liệu (ISO, 2020).

Theo đó, việc lựa chọn vật liệu cần xem xét khả năng tách rời khỏi sản phẩm hoặc cấu kiện, mức độ kết hợp với các vật liệu khác, khả năng tái sử dụng, tái chế và phương án xử lý sau khi kết thúc một vòng sử dụng. Điều này cho thấy giá trị của vật liệu không chỉ được xác định ở nguồn gốc và giai đoạn sử dụng, mà còn ở khả năng được thu hồi và tiếp tục duy trì trong các chu trình tiếp theo, từ đó giảm phụ thuộc vào nguyên liệu mới và tạo điều kiện cho các dòng vật liệu thứ cấp hình thành. (Hình 3)

Lớp kiểm chứng thông tin (+1): dữ liệu, công bố và chứng nhận

Để 4 phương diện trên có thể hỗ trợ lựa chọn vật liệu, thông tin sử dụng trong đánh giá cần có cơ sở kiểm chứng. Dữ liệu kỹ thuật, công bố môi trường, nhãn sinh thái và các chứng nhận chuyên biệt vì vậy tạo thành lớp thông tin kiểm chứng (+1) xuyên suốt khung xem xét.

Mỗi hình thức chỉ cung cấp thông tin trong một phạm vi nhất định và không đại diện cho toàn bộ các thuộc tính bền vững của sản phẩm. Phạm vi hỗ trợ của một số công cụ, công bố và chứng nhận thường gặp được tổng hợp tại Bảng 1.

Do đó, nhà thiết kế và người sử dụng cần xác định thuộc tính kiểm chứng trước khi lựa chọn dữ liệu, công bố hoặc chứng nhận phù hợp, thay vì xem một "tem xanh" như bằng chứng tổng quát về tính bền vững của sản phẩm. Cách tiếp cận này đồng thời đặt ra yêu cầu về tính minh bạch, khả năng truy xuất và chất lượng thông tin trong chuỗi cung ứng vật liệu.

BÀN LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy lựa chọn vật liệu nội thất theo hướng phát thải thấp cần vượt ra ngoài cách đánh giá dựa trên một thuộc tính riêng lẻ. Bốn phương diện của khung 4+1 tích hợp các khía cạnh môi trường, sức khỏe, độ bền và tính tuần hoàn trong cùng một cấu trúc, phản ánh đầy đủ hơn các tác động và yêu cầu phát sinh trong vòng đời vật liệu.

- Đóng góp khoa học cốt lõi của khung 4+1 là thiết lập mối liên kết giữa tư duy vòng đời và quyết định lựa chọn vật liệu ở cấp thiết kế. Đặc biệt, lớp "+1 - thông tin kiểm chứng" được xem như một điều kiện xuyên suốt, giúp đánh giá mức độ tin cậy của dữ liệu về nguồn gốc, phát thải, sức khỏe, tuổi thọ và khả năng tuần hoàn. Đây là điểm giúp khung không chỉ xác định cần đánh giá những gì, mà còn đặt ra yêu cầu dựa trên thông tin nào để đánh giá.
- Khung cũng làm rõ bản chất đa tiêu chí và các mối quan

Hình 4. Minh hoạ một số dạng đánh đổi (trade-offs) trong lựa chọn vật liệu nội thất. Nguồn: Tác giả minh hoạ

hệ đánh đổi trong lựa chọn vật liệu. Một vật liệu có thể có ưu thế về carbon nhưng chưa chắc tối ưu về độ bền, sức khỏe, chi phí hoặc khả năng tuần hoàn. Vì vậy, khung 4+1 không nhằm xác định một vật liệu tốt nhất một cách tuyệt đối, mà cung cấp cấu trúc để lựa chọn theo chức năng, điều kiện sử dụng, tuổi thọ và kịch bản cuối vòng đời.

- Về khả năng ứng dụng, khung 4+1 có thể được phát triển thành hệ thống tiêu chí định lượng, trọng số và mô hình đánh giá đa tiêu chí, đồng thời làm cơ sở tham khảo cho việc xây dựng tiêu chí vật liệu nội thất trong đánh giá công trình xanh và công trình phát thải thấp tại Việt Nam. Tuy nhiên, để chuyển từ khung khái niệm sang công cụ đánh giá, cần tiếp tục kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm, EPD và các trường hợp nghiên cứu cụ thể. (Hình 4)

KẾT LUẬN

Lựa chọn vật liệu nội thất bền vững cần được xem xét theo toàn bộ vòng đời, thay vì dựa trên một thuộc tính riêng lẻ như nguồn gốc, hàm lượng tái chế hay nhãn môi trường. Trên cơ sở tổng quan, phân tích - tổng hợp và đối chiếu tài liệu, nghiên cứu đề xuất khung 4+1, gồm 4 phương diện: (1) nguồn gốc và tác động môi trường; (2) sức khỏe và chất lượng môi trường trong nhà; (3) độ bền, bảo trì và tuổi thọ; (4) thu hồi, tái sử dụng và tuần hoàn; cùng lớp thông tin kiểm chứng xuyên suốt.

Khung 4+1 cho thấy các phương diện đánh giá có thể tồn tại những đánh đổi, do đó lựa chọn vật liệu cần gắn với chức năng, điều kiện sử dụng, tuổi thọ và phương án cuối vòng đời, trên cơ sở thông tin có khả năng kiểm chứng.

Khung đề xuất đồng thời tạo cơ sở tham chiếu để chuyển hóa các định hướng về tăng trưởng xanh, sử dụng hiệu quả tài nguyên và kinh tế tuần hoàn thành những cân nhắc cụ thể ở cấp thiết kế, góp phần hỗ trợ lựa chọn vật liệu nội thất cho các công trình phát thải thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

[1] Chính phủ (2026), Nghị định số 209/2026/NĐ-CP ngày 15/6/2026 quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành Luật Xây dựng về quản lý vật liệu xây dựng.

[2] Cradle to Cradle Products Innovation Institute (2026), Cradle to Cradle Certified® Product Standard (Full Scope), Version 5.0.

[3] UL Standards & Engagement (2022), UL Environment 2818: GREENGUARD Certification Program for Chemical Emissions for Building Materials, Finishes and Furnishings, 2nd ed.

[4] United Nations Environment Programme (2004), Why Take a Life Cycle Approach? UNEP/SETAC Life Cycle Initiative.

[5] International Organization for Standardization (2006), ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva: ISO.

[6] International Organization for Standardization (2011), ISO 15686-1:2011 Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles and framework. Geneva: ISO.

[7] International Organization for Standardization (2020), ISO 20887:2020 Sustainability in buildings and civil engineering works - Design for disassembly and adaptability - Principles, requirements and guidance. Geneva: ISO.

[8] International Organization for Standardization (2024), ISO 59004:2024 Circular

economy - Vocabulary, principles and guidance for implementation. Geneva: ISO.

[9] International Organization for Standardization (2026), ISO 14025:2026 Environmental statements and programmes for products - Environmental product declarations (EPDs). Geneva: ISO.

[10] Thủ tướng Chính phủ (2020), Quyết định số 1266/QĐ-TTg ngày 18/8/2020 phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050.

TOD và tầm nhìn xa cho nhà ở xã hội

NGUYỄN HOÀNG LINH

Theo dự báo, mục tiêu phát triển 158.700 căn nhà ở xã hội của Chính phủ giao năm 2026 (tăng khoảng 1,5 lần so với năm 2025) sẽ được thực hiện vượt mức kế hoạch. Đó là một tin vui. Tuy nhiên, với tầm nhìn xa của chương trình an sinh lâu dài đậm chất nhân văn này, các nhà hoạch định chiến lược đã và đang tìm ra những giải pháp căn cơ hơn, bài bản hơn.

RẤT THIẾU VÀ... VẪN THỪA!

Những năm gần đây, khi Chính phủ quyết liệt chỉ đạo thực hiện Chương trình 1 triệu căn hộ nhà ở xã hội (NƠXH) đến năm 2030, việc lo nhà ở cho các đối tượng có thu nhập thấp đã có những bước tiến đáng khích lệ. Nếu so với giai đoạn 2023 - 2024 chỉ đạt khoảng 40 - 50 nghìn căn mỗi năm thì năm 2025 đã đạt hơn 100 nghìn căn. Dự báo mục tiêu phát triển 158.700 căn NƠXH của Chính phủ giao năm 2026 (tăng khoảng 1,5 lần so với năm 2025) sẽ được thực hiện vượt mức kế hoạch.

Ai cũng hiểu rằng, con số ấy còn xa mới đáp ứng được nhu cầu thực của đông đảo người dân. Tuy nhiên, một trong những điều đáng băn khoăn là mặc dù vậy nhưng không ít dự án NƠXH đã hoàn thành khi mở bán lại rất ít người đăng ký, khiến nhiều căn hộ bỏ không lâu năm, không chỉ gây lãng phí nguồn lực xã hội vốn eo hẹp mà còn để lại những hệ lụy không đáng có cho cả các cơ quan quản lý lẫn chủ đầu tư.

Xin nêu một ví dụ khá điển hình đã được thông tin đại chúng quan tâm nhiều năm, đó là dự án NƠXH Bamboo Garden thuộc khu đô thị Sunny Garden City ở Hà Nội. Đây vốn là dự án thương mại nhưng được Tập đoàn CEO xin chuyển đổi thành NƠXH vào năm 2014. Trong lịch sử số lần ra thông báo tiếp nhận hồ sơ bán và cho thuê NƠXH của Sở Xây dựng Hà Nội thì con số lần thứ 21 của dự án này có thể được coi là một kỷ lục. Trong suốt 5 năm trời ròng rã, 322 căn để bán và 86 căn cho thuê của Bamboo Garden vẫn không bán hết.

Với chủ đầu tư, thời gian mở bán kéo dài sẽ là một tai họa trong việc thu hồi vốn, và hậu quả khó tránh khỏi là những nhập nhằng, sai sót trong xét chọn đối tượng hưởng thụ. Đến tận đầu năm 2025, tức là sau 10 năm đưa vào sử dụng, chính quyền địa phương vẫn còn vất vả với dự án khi nhiều lần phải ra văn bản đôn đốc các cơ quan chức năng triển khai kiểm tra và xử lý vi phạm các quy định pháp luật tại dự án.

Khi phân tích nguyên nhân xảy ra tình trạng nêu trên, hầu hết ý kiến đều cho rằng không phải vì giá cao (giá căn hộ bán đã bao gồm VAT + 2% phí bảo trì tạm tính là 9.960.000 đ/m^2 và giá cho thuê là 48.000 đ/m^2/tháng) mà chủ yếu là do vị trí dự án cách xa trung tâm thành phố, giao thông thiếu kết nối đồng bộ với hạ tầng xã hội, như bệnh viện, trường học…

Thực tiễn cho thấy, Hà Nội không thiếu những dự án lâm vào tình trạng tương tự, như Dự án NƠXH AZ Thăng Long ở Hoài Đức cũng phải thông báo mở bán lần thứ 12, hay Dự án NƠXH tại Đông Hội - Đông Anh phải mở bán đến lần thứ 8...

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

TOD VÀ NHỮNG GIẢI PHÁP ĐẦY HY VỌNG

Theo các chuyên gia, khi NƠXH quá xa nơi làm việc, người dân sẽ tốn nhiều thời gian di chuyển, đặc biệt với những gia đình có con nhỏ, người cao tuổi. Họ có nhu cầu muốn sống gần trung tâm hoặc nếu ở ngoại thành thì giao thông phải thuận tiện để tiết kiệm thời gian và chi phí trong sinh hoạt cùng công việc. Vì thế, khi mô hình phát triển đô thị gắn với công cộng TOD đang được triển khai mạnh mẽ tại Việt Nam, một cánh cửa mới đã mở ra nhiều giải pháp đầy hy vọng cho sự nghiệp phát triển NƠXH căn cơ và bài bản.

Thực tiễn trên thế giới đã chứng minh, những mô hình TOD thành công thường trở thành chất xúc tác tái cấu trúc toàn bộ đô thị. Khi giao thông công cộng được tích hợp cùng thương mại, không gian công cộng, văn phòng, nhà ở và các tiện ích sống, giá trị tạo ra không chỉ nằm ở bất động sản, mà còn ở khả năng hình thành những trung tâm kinh tế và cộng đồng mới cho thành phố.

Từ đó có thể nhận thấy, khi sự nghiệp phát triển NƠXH của quốc gia được đặt trong bối cảnh thành công ấy sẽ có sức sống bền vững hơn bao giờ hết, bởi lẽ nó không chỉ được bao bọc, hỗ trợ của sự ưu đãi từ chính sách vĩ mô mà còn được hưởng thụ những giá trị vật chất và tinh thần của cộng đồng xã hội đem lại.

Tại một hội thảo mới đây, đại diện Sở Quy hoạch - Kiến trúc TP.HCM cho biết, thành phố đã xây dựng phương án bổ sung hàng trăm héc-ta đất trong các khu TOD để phát triển NƠXH. Trong giai đoạn đến năm 2030, TP.HCM (trước hợp nhất) dự kiến có khoảng 580 - 600 ha đất dành cho nhu cầu này. Ở giai đoạn tiếp theo đến năm 2040, quy mô quỹ đất NƠXH sẽ tiếp tục được mở rộng, dự kiến nâng tổng diện tích lên khoảng 1.400 ha, trong đó riêng phần diện tích hình thành từ các khu TOD khác và các khu vực phát triển đô thị được ước tính từ 400 - 600 ha.

Cho dù vậy nhưng vẫn còn đó những lo lắng ngay tại hội thảo. Theo bà Đỗ Thị Thu Giang - Giám đốc Toàn quốc Bộ phận Tư vấn và Định giá Savills Việt Nam, thông thường, giá đất quanh các nhà ga metro sẽ tăng mạnh sau khi hạ tầng được đầu tư. Khi đó, chính những người sử dụng giao thông công cộng thường xuyên nhất như công nhân, người lao động có thu nhập thấp có nguy cơ bị đẩy ra xa những khu vực được hưởng lợi nhiều nhất từ hệ thống giao thông hiện đại.

Để tránh kịch bản này, theo bà Giang, các khu đất dành cho phát triển NƠXH cần được quy hoạch ngay trong các khu TOD, được bố trí trong phạm vi 300 - 500 m quanh nhà ga, tương đương khoảng cách đi bộ từ 5 - 10 phút. Việc sinh sống gần các tuyến giao thông công cộng giúp người dân giảm đáng kể chi phí đi lại, tiếp cận thuận lợi hơn với việc làm, trường học, bệnh viện và các dịch vụ đô thị.

KHÔNG ĐỂ "Ế" NƠXH QUÁ 12 THÁNG!

Cho dù mô hình TOD đang được triển khai mạnh mẽ tại Việt Nam đã mở ra một cánh cửa mới đầy hy vọng cho sự nghiệp phát triển NƠXH nhưng thách thức vẫn còn không ít, nguồn cung vẫn còn thấp xa so với nhu cầu.

> ***Giá đất quanh các nhà ga metro sẽ tăng mạnh sau khi hạ tầng được đầu tư. Khi đó, những người sử dụng giao thông công cộng thường xuyên nhất như công nhân, người lao động có thu nhập thấp có nguy cơ bị đẩy ra xa những khu vực được hưởng lợi nhiều nhất từ hệ thống giao thông hiện đại".***

Có lý do tại một số địa phương có bố trí quỹ đất, nhưng nhiều vị trí lại xa trung tâm, thiếu kết nối hạ tầng kỹ thuật và hạ tầng xã hội. Điều này khiến nhà đầu tư không mặn mà tham gia, đồng thời làm giảm sức hút đối với người mua.

Có lý do vì trong một thời gian dài, nguồn cung bất động sản trên thị trường bị lệch về phân khúc cao cấp và trung - cao cấp, trong khi thiếu nghiêm trọng sản phẩm phù hợp với khả năng chi trả của người thu nhập thấp và trung bình. Giá nhà thương mại bị đẩy lên cao đã tạo áp lực lớn lên nhu cầu NƠXH.

Có cả lý do về thủ tục đầu tư, lựa chọn chủ đầu tư và triển khai dự án trước đây còn phức tạp, kéo dài. Tuy thời gian gần đây, với việc ban hành các cơ chế thí điểm và chính sách đặc thù phát triển NƠXH, nhiều vướng mắc đã từng bước được tháo gỡ…

Còn một lý do nữa như ở phần đầu bài viết này đã nêu, lãng phí nguồn lực xã hội do những dự án NƠXH chậm đưa vào khai thác vì nhiều nguyên nhân khác nhau.

Được biết, để khắc phục tình trạng này, tại Luật Thủ đô (sửa đổi) có hiệu lực thi hành từ 01/7/2026, Hà Nội được chuyển đổi giữa các loại hình nhà ở thương mại, xã hội, tái định cư đáp ứng nhu cầu người dân. Thông tin mới nhất, Hà Nội đang lấy ý kiến cho bản Dự thảo quy định chi tiết về điều kiện chuyển đổi từng loại nhà hình nhà ở và trình tự, thủ tục. Trong đó, với nhóm NƠXH, dự kiến chuyển đổi thành nhà thương mại nếu sau 12 tháng chủ đầu tư không bán hết căn hộ. Tỷ lệ NƠXH chuyển đổi tối đa 20% tổng số căn hộ tại một dự án.

Thiết nghĩ đây là một giải pháp cần thiết để chính quyền địa phương có thêm công cụ nhằm khai thác tối đa nguồn lực xã hội trong việc lo nhà ở cho người dân.

TS Hà Minh

CONINCO: Tối ưu nội lực, vững bước vươn tầm

> **NGỌC HÀ** (thực hiện)

Bước vào chu kỳ phát triển mới của đất nước, CONINCO tập trung đổi mới quản trị, phát triển nhân lực, chuyển đổi số và hợp tác quốc tế với mục tiêu nâng cao năng lực cạnh tranh, từng bước làm chủ công nghệ và vươn lên dẫn dắt chuỗi giá trị tư vấn xây dựng cốt lõi.

Nhân kỷ niệm Ngày Doanh nhân Việt Nam 13/10, Tạp chí Xây dựng đã có cuộc trao đổi với TS Hà Minh - Chủ tịch HĐQT Công ty CP Tư vấn công nghệ, thiết bị và kiểm định xây dựng - CONINCO về chiến lược phát triển của doanh nghiệp trong chu kỳ đầu tư hạ tầng mới.

TỐI ƯU NỘI LỰC ĐỂ NÂNG SỨC CẠNH TRANH

Sau gần một năm làm Chủ tịch HĐQT, quyết sách trọng tâm nào đã được ông ưu tiên triển khai để ổn định hệ thống và tạo đà bứt phá cho CONINCO?

- Thời điểm cuối năm 2025 là giai đoạn bản lề, không chỉ với sự chuyển giao của tổ chức mà còn là lúc toàn ngành Xây dựng đang đứng trước những thay đổi nhanh chóng của kinh tế vĩ mô và xu thế công nghệ toàn cầu. Để thích ứng và dẫn dắt trong nhịp độ mới này, quyết sách trọng tâm của tôi là "Tối ưu hóa nguồn lực và đẩy mạnh chuyển đổi số toàn diện".

Mục tiêu cốt lõi là tích hợp sâu rộng nền tảng công nghệ vào toàn bộ hệ thống điều hành., số hóa dữ liệu nhằm gia tăng tốc độ xử lý công việc và khả năng phản ứng linh hoạt với thị trường. Bên cạnh đó, thế mạnh lớn nhất của CONINCO luôn là con người. Do vậy, tôi đặc biệt chú trọng đến việc tạo không gian sáng tạo tối đa cho đội ngũ cán bộ chủ chốt.

Sức mạnh cộng hưởng từ tư duy công nghệ và sự chủ động, tự chủ đã giúp CONINCO duy trì được đà tăng trưởng ổn định và tiếp tục ghi dấu ấn mạnh mẽ tại các dự án trọng điểm: Trung tâm Hội nghị APEC; Cảng HKQT Phú Quốc; Trung tâm Dữ liệu Quốc gia số 1; Trường Đại học Kiểm sát; Trụ sở các Bộ, ban ngành, trụ sở các tập đoàn kinh tế lớn, tuyến đường sắt Lào Cai - Hà Nội - Hải Phòng, tuyến đường sắt đô thị số 1…

Đến hết 9 tháng năm 2026, giá trị hợp đồng ký kết của CONINCO đã đạt gần 200% kế hoạch cả năm. Thành quả này phản ánh bức tranh thị trường đầy triển vọng, đồng thời là thước đo chân thực nhất cho hiệu quả và khẳng định vị thế cạnh tranh của Công ty.

CONINCO xác định lợi thế cạnh tranh nào trước làn sóng đầu tư hạ tầng lớn?

- Việc đẩy mạnh hạ tầng giao thông, quy hoạch đô thị và các trung tâm công nghệ cao mở ra nhiều cơ hội, nhưng cũng đặt doanh nghiệp tư vấn trong nước trước những thách thức lớn. Các dự án trọng điểm quốc gia này đòi hỏi tiêu chuẩn cao về công nghệ, quản trị, chất lượng, an toàn, môi trường và phát triển bền vững. Nếu chỉ đảm nhận công việc truyền thống, doanh nghiệp sẽ khó nâng vị trí trong chuỗi giá trị.

Lợi thế của CONINCO là kinh nghiệm qua nhiều dự án lớn, với gần 1.800 kỹ sư, kiến trúc sư, chuyên gia có chuyên môn sâu và sự am hiểu điều kiện thực tế, pháp luật, tiêu chuẩn, quy chuẩn xây dựng tại Việt Nam. Trên nền tảng đó, chúng tôi tiếp tục nâng cao năng lực tích hợp giải pháp, quản lý dự án phức tạp và tiếp cận công nghệ mới. Doanh nghiệp tư vấn phải đồng hành với chủ đầu tư từ lựa chọn giải pháp kỹ thuật, công nghệ đến kiểm soát tiến độ, chất lượng, chi phí và hiệu quả đầu tư.

Mục tiêu của CONINCO là đảm nhận những phần việc có hàm lượng tri thức, giá trị gia tăng cao hơn, khẳng định năng lực tại thị trường trong nước và vươn ra quốc tế.

NHÂN LỰC VÀ DỮ LIỆU TẠO NỀN TẢNG LÀM CHỦ CÔNG NGHỆ

CONINCO chuẩn bị nhân lực ra sao cho các dự án đường sắt quy mô lớn?

- Đường sắt tốc độ cao và đường sắt đô thị là các dự án có hàm lượng công nghệ lớn, yêu cầu đồng bộ giữa hạ tầng, phương tiện, hệ thống điều khiển, an toàn và vận hành. Đây là lĩnh vực Việt Nam còn cần tích lũy kinh nghiệm, vì vậy nhân lực phải đi trước một bước.

Để sẵn sàng cho kỷ nguyên hạ tầng mới, chúng tôi đã và đang triển khai đồng bộ 4 mũi nhọn chiến lược mục đích

CONINCO vinh dự nhận Giải thưởng "Top 1 Doanh nghiệp tư vấn xây dựng chất lượng, uy tín hàng đầu Việt Nam năm 2026".

chuẩn hóa nền tảng học thuật trong nước và chuyển giao công nghệ quốc tế.

Thứ nhất, chủ động hợp tác với các trường đại học hàng đầu trong nước để đào tạo chuyên sâu, xây dựng lực lượng kỹ sư đường sắt nòng cốt có nền tảng học thuật vững chắc.

Thứ hai, hợp tác với tập đoàn hàng đầu của Nhật Bản để triển khai các chương trình đào tạo độc quyền, giúp đội ngũ tiếp cận trực tiếp với các tiêu chuẩn và công nghệ lõi.

Thứ ba, tăng cường tổ chức các đoàn công tác trực tiếp khảo sát, nghiên cứu mô hình hạ tầng tại các quốc gia phát triển. Mục tiêu không chỉ để đúc rút kinh nghiệm quản lý, vận hành thực tiễn, mà quan trọng hơn là trực tiếp đánh giá, tiếp thu những tiến bộ công nghệ lõi tiên tiến nhất, từ đó kiến tạo nền tảng kỹ thuật vững chắc để sẵn sàng ứng dụng vào các siêu dự án tại Việt Nam.

Thứ tư, đẩy mạnh liên danh, hợp tác với các đối tác nước ngoài uy tín để trực tiếp tham gia triển khai một số dự án đường sắt đô thị và đường sắt tốc độ cao, tạo môi trường cho kỹ sư cọ xát và làm chủ công nghệ ngay trên công trường.

Thưa ông, chuyển đổi số đang tạo ra thay đổi gì trong hoạt động của CONINCO?

- Chuyển đổi số phải được thể hiện bằng hiệu quả quản trị, năng suất lao động và chất lượng sản phẩm tư vấn. Thay vì chỉ dừng ở đầu tư phần mềm hay số hóa một số quy trình, CONINCO đang từng bước tích hợp các nền tảng công nghệ vào quản trị, số hóa và khai thác dữ liệu phục vụ điều hành, quản lý dự án. Công ty đồng thời nghiên cứu ứng dụng AI, dữ liệu lớn và các công cụ số vào chuyên môn.

Dữ liệu tích lũy từ nhiều loại hình công trình, dự án là tài sản quan trọng. Khi được chuẩn hóa, kết nối và khai thác hiệu quả, nguồn dữ liệu này sẽ hỗ trợ ra quyết định, kiểm soát rủi ro và nâng cao chất lượng tư vấn.

Chúng tôi hướng tới hệ sinh thái dữ liệu có khả năng chia sẻ trong toàn Công ty, giảm công việc lặp lại, tăng phối hợp giữa các bộ phận và hỗ trợ chuyên gia quyết định nhanh, chính xác hơn. Lợi thế cạnh tranh trong những năm tới sẽ phụ thuộc ngày càng nhiều vào khả năng kết hợp tri thức con người với dữ liệu và công nghệ. CONINCO đang chuẩn bị cho sự chuyển dịch đó.

HỢP TÁC QUỐC TẾ ĐỂ NÂNG VỊ THẾ TƯ VẤN VIỆT NAM

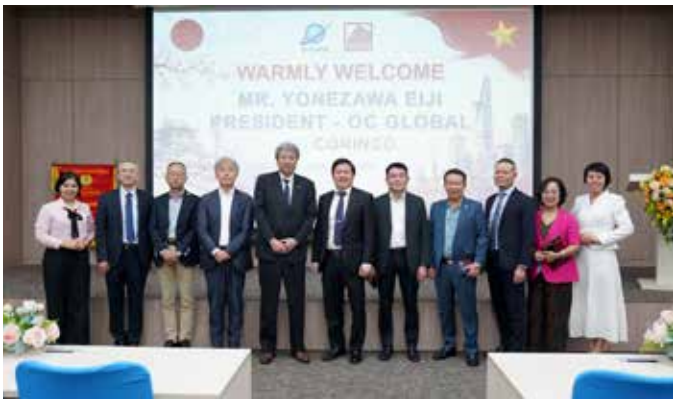
CONINCO kỳ vọng gì từ việc mở rộng hợp tác quốc tế?

- Triết lý hợp tác của CONINCO là "Bình đẳng và Cộng hưởng". Đối tác quốc tế có thế mạnh về công nghệ, kinh nghiệm triển khai dự án lớn và quản trị tiên tiến. CONINCO có sự am hiểu thị trường Việt Nam, điều kiện thực tế, pháp luật, tiêu chuẩn, quy chuẩn và năng lực tổ chức triển khai. Sự bổ trợ này tạo giá trị cho cả hai bên.

Chúng tôi đang mở rộng quan hệ với các đối tác Nhật Bản, Hàn Quốc, Trung Quốc, Pháp, Australia và nhiều thị trường khác; đồng thời tham gia dự án có yếu tố nước ngoài và đẩy mạnh các hoạt động tại Lào.

Đường sắt tốc độ cao, đường sắt đô thị, sân bay, công trình ngầm và các dự án hạ tầng chiến lược sẽ là môi trường để Công ty nâng cao năng lực. Điều kiện quyết định vẫn là đội ngũ có đủ tri thức, kinh nghiệm và bản lĩnh.

Trong thời gian tới, chiến lược của chúng tôi là tiếp tục mở rộng thị trường, đưa thương hiệu tư vấn xây dựng Việt Nam vươn ra khu vực, đồng thời đóng vai trò cầu nối đưa các công nghệ tiên tiến của thế giới về ứng dụng tại Việt Nam.



Chủ tịch Tập đoàn OC Global Nhật Bản thăm và làm việc tại CONINCO.

Nhân kỷ niệm Ngày Doanh nhân Việt Nam 13/10, ông có thông điệp gì muốn gửi gắm tới cộng đồng doanh nghiệp ngành Xây dựng, các đối tác đã đồng hành cùng CONINCO, cũng như toàn thể cán bộ nhân viên công ty?

- Nhân Ngày Doanh nhân Việt Nam, tôi xin gửi lời chúc sức khỏe và thành công tới cộng đồng doanh nhân, doanh nghiệp ngành Xây dựng. Chúng ta đang gánh vác sứ mệnh góp phần thay đổi diện mạo hạ tầng của đất nước. Dù phía trước còn nhiều thử thách, nhưng với trí tuệ và khát vọng vươn lên, tôi tin rằng các doanh nghiệp Việt Nam sẽ làm chủ được những công nghệ tiên tiến.

CONINCO trân trọng sự tin tưởng của Đảng, Chính phủ, Nhà nước và các cơ quan Bộ, Ban, ngành, các đối tác, khách hàng đã luôn đồng hành cùng chúng tôi. Đặc biệt, tôi muốn dành lời cảm ơn nhất tới các thế hệ cán bộ, kỹ sư CONINCO - những người đã và đang miệt mài trên các công trường, không quản ngại khó khăn để viết tiếp những trang sử vẻ vang của Công ty. CONINCO sẽ tiếp tục đổi mới, sáng tạo, không ngừng nâng cao năng lực để luôn là biểu tượng của sự "Chắc chắn cho tương lai".

Trân trọng cảm ơn ông!

PHÚC ĐẠT TÂN UYÊN:

Dấu ấn thi công nhà ở xã hội tại TP.HCM

> YÊN THƯ

Với tổng mức đầu tư dự kiến khoảng 1.300 tỷ đồng và quy mô 936 căn hộ, Nhà ở xã hội Phúc Đạt Tân Uyên đã cất nóc ba tòa tháp, chuyển sang giai đoạn hoàn thiện. Tiến độ này cùng thông tin pháp lý được công khai và hệ thống tiện ích được quy hoạch đồng bộ góp phần củng cố niềm tin của người mua nhà, thể hiện trách nhiệm của Phúc Đạt Group với nhu cầu an cư của cộng đồng.

TIẾN ĐỘ VÀ PHÁP LÝ CỦNG CỐ NIỀM TIN

Trong bối cảnh nhu cầu nhà ở xã hội (NƠXH) tại TP.HCM ngày càng lớn, người mua quan tâm đến giá bán, vị trí, chính sách hỗ trợ tài chính và năng lực triển khai thực tế của chủ đầu tư. Với nhiều gia đình trẻ, người lao động, mua căn hộ là quyết định tài chính quan trọng. Tiến độ xây dựng, sự minh bạch pháp lý và khả năng thực hiện cam kết vì thế có ảnh hưởng trực tiếp đến lựa chọn của khách hàng.

Khu NƠXH cao tầng Phúc Đạt Tân Uyên tọa lạc tại phường Tân Hiệp, TP.HCM, trước đây thuộc TP Tân Uyên, tỉnh Bình Dương. Dự án do Công ty TNHH Sản xuất và Thương mại Phúc Đạt, thuộc hệ sinh thái Phúc Đạt Group, làm chủ đầu tư, được quy hoạch trên khu đất rộng 11.440,8 m^2, tổng diện tích sàn xây dựng khoảng 76.656 m^2.

Theo quy hoạch, công trình gồm ba block A, B, C cao 18 tầng và một tầng hầm chung. Trong tổng số 936 căn hộ, block A có 187 căn, block B có 460 căn, block C có 289 căn. Các căn hộ có nhiều loại diện tích, hướng đến nhu cầu của người độc thân, vợ chồng trẻ và gia đình có con nhỏ.

Việc hoàn thành cất nóc ba tòa tháp đánh dấu bước tiến trong quá trình triển khai dự án. Trên cơ sở tiến độ đạt được, chủ đầu tư dự kiến hoàn thành xây dựng vào tháng 6/2027 và bàn giao căn hộ trong tháng 7/2027. Kế hoạch này tùy thuộc vào tiến độ thực tế và việc đáp ứng các điều kiện bàn giao theo quy định. Giai đoạn hoàn thiện kiến trúc, hệ thống kỹ thuật, tiện ích và các hạng mục phục vụ vận hành tiếp tục được chú trọng để bảo đảm chất lượng công trình.

Bên cạnh thi công, minh bạch pháp lý giúp khách hàng chủ động tìm hiểu dự án, chuẩn bị hồ sơ và thực hiện giao dịch. NƠXH có quy định riêng về đối tượng được mua, điều kiện xét duyệt, tiếp nhận hồ sơ và ký hợp đồng. Với người mua lần đầu, việc được hướng dẫn rõ từng bước có ý nghĩa thiết thực.

Phúc Đạt Group cho biết dự án đã có giấy phép xây dựng, giấy phép môi trường và các văn bản về phòng cháy, chữa cháy. Công văn số 8677/SXD-PTĐT ngày 18/3/2026 của Sở Xây dựng TP.HCM thông báo 936 căn hộ thuộc dự án đủ điều kiện được bán dưới hình thức nhà ở hình thành trong tương lai. Thông tin được công bố trên website dự án; các thủ tục

Phối cảnh dự án Nhà ở xã hội Phúc Đạt Tân Uyên

Phúc Đạt Group xây dựng thương hiệu từ chất lượng sản phẩm, giá trị sử dụng và nhu cầu an cư của cộng đồng.

nghiệm thu và điều kiện bàn giao phải tiếp tục được đáp ứng ở những giai đoạn sau.

Doanh nghiệp cũng cập nhật hình ảnh công trường, tiến độ hoàn thiện và thông báo liên quan qua website, các kênh truyền thông chính thức. Khách hàng đã chọn căn hộ có thể theo dõi để chuẩn bị tài chính, sắp xếp kế hoạch sinh hoạt; người đang quan tâm có thêm cơ sở tìm hiểu, đánh giá quá trình xây dựng. Duy trì thông tin xuyên suốt từ thi công đến bàn giao góp phần thể hiện trách nhiệm của chủ đầu tư với người mua nhà.

NÂNG TẦM TRẢI NGHIỆM SỐNG TẠI NƠXH

Theo chủ đầu tư, Phúc Đạt Tân Uyên được phát triển theo định hướng kết hợp không gian cư trú với tiện ích thương mại, dịch vụ và sinh hoạt cộng đồng. Hệ thống tiện ích được quy hoạch nhằm đáp ứng nhu cầu hằng ngày, tạo điều kiện để cư dân xây dựng cuộc sống ổn định, lâu dài.

Quy hoạch bố trí 39 căn shophouse tại tầng một, trung tâm thương mại tại tầng hai, cùng các không gian giáo dục, vận động và kết nối cộng đồng. Khu nhà trẻ có diện tích khoảng 700 m^2, khu sinh hoạt cộng đồng khoảng 744 m^2, phòng gym khoảng 200 m^2. Hồ bơi tràn bờ kết hợp sân vườn được quy hoạch tại tầng ba, ở vị trí nối block A và block B. Ngoài ra còn có công viên nội khu, sân chơi trẻ em, khu tập thể dục ngoài trời và bãi đậu xe.

Với các gia đình trẻ, nhà trẻ, sân chơi và không gian cộng đồng có thể tạo thuận lợi cho việc chăm sóc, nuôi dạy con cái. Các khu vực vận động, thư giãn cùng dịch vụ thương mại bổ sung điều kiện phục vụ đời sống cư dân. Việc bố trí tiện ích trong cùng khu nhà ở thể hiện định hướng bổ sung nguồn cung NƠXH gắn với chất lượng không gian sống và giá trị sử dụng lâu dài.

Tọa lạc trong Khu dân cư Phúc Đạt, dự án có khả năng kết nối với các khu vực công nghiệp, đô thị phía Bắc và Đông Bắc TP HCM. Cư dân có thể di chuyển đến Dĩ An, Thuận An, Thủ Dầu Một qua mạng lưới giao thông hiện hữu. Khu vực tiếp cận các tuyến ĐT746, Quốc lộ 13, Mỹ Phước - Tân Vạn; xung quanh có các khu công nghiệp Nam Tân Uyên, Uyên Hưng, VSIP II, VSIP III, Đại Đăng và Kim Huy.

Hoạt động sản xuất tại khu vực tạo nhu cầu nhà ở từ người lao động, kỹ sư, nhân viên văn phòng và các gia đình đang làm việc, sinh sống nơi đây. Vị trí phù hợp với nơi làm việc, giao thông thuận tiện và môi trường sống ổn định là những yếu tố tạo nên giá trị sử dụng của căn hộ. Quy mô 936 căn cùng hệ thống tiện ích được quy hoạch đồng bộ hướng đến đáp ứng nhu cầu an cư thực tế, từng bước hình thành cộng đồng cư dân mới.

Phúc Đạt Group xác định xây dựng thương hiệu từ chất lượng sản phẩm, giá trị sử dụng và nhu cầu an cư của cộng đồng. Sau cất nóc, doanh nghiệp tiếp tục chú trọng các khâu hoàn thiện, nghiệm thu, bàn giao và vận hành. Thông điệp "Phúc Đạt không chỉ xây nhà - Phúc Đạt xây dựng niềm tin" được gắn với tiến độ thực tế, chất lượng công trình và trách nhiệm đối với khách hàng.❖

Thông tin dự án: phucdat.vn/noxhtanuyen. Hotline: 033 5555 189.

SOLA - kiến tạo cuộc sống khỏe mạnh từ những điều gần gũi

> PV

Một cuộc sống đáng sống không nhất thiết được tạo nên từ những điều lớn lao, mà bắt đầu từ những trải nghiệm gần gũi trong từng ngày: một khoảng xanh để thư giãn, một cung đường để vận động, hay những tiện ích thiết yếu luôn nằm trong tầm bước chân.

Tại SOLA, bán đảo thuộc khu đô thị quốc tế The Global City ở khu Đông TP.HCM, những giá trị ấy được kết nối trong một không gian sống hài hòa giữa thiên nhiên, vận động và tiện nghi đô thị.

3 MẶT NƯỚC - LỢI THẾ CỦA MỘT KHÔNG GIAN SỐNG RIÊNG TƯ

Trong một đô thị, mặt nước thường được nhắc đến như một giá trị cảnh quan. Nhưng tại SOLA, 3 mặt nước bao quanh bán đảo còn góp phần định hình trải nghiệm sống khác biệt.

Khoảng không gian tiếp giáp với mặt nước tạo nên tầm nhìn thoáng rộng, đồng thời mang đến sự chuyển tiếp mềm mại giữa nơi ở và nhịp chuyển động của phố thị. Thiên nhiên vì thế không chỉ hiện diện trong tầm mắt, mà trở thành một phần của đời sống thường ngày, đem lại cảm giác thư thái và riêng tư cho cộng đồng cư dân trong không gian compound villa.

Một bên là hệ sinh thái đô thị quốc tế The Global City với đa dạng tiện ích, dịch vụ và trải nghiệm. Một bên là không gian sống biệt lập hơn trên bán đảo 3 mặt nước, nơi cư dân có thể tận hưởng sự tĩnh tại giữa nhịp phát triển sôi động của đô thị.

Đó cũng là nét hấp dẫn riêng của SOLA: Kết nối với một trung tâm đô thị năng động mà vẫn giữ được khoảng riêng cho mỗi người, những phút giây nghỉ ngơi và cân bằng luôn có chỗ trong nhịp sống mỗi ngày.

5 CÔNG VIÊN, KHƠI MỞ NHỊP SỐNG NĂNG ĐỘNG

Thay vì tập trung hoạt động thể chất vào một không gian duy nhất, SOLA phân bổ những khoảng xanh với các chủ đề và chức năng khác nhau, tạo thành một mạng lưới vận động đa lớp ngay trong bán đảo. Ở đó, mỗi thế hệ có thể tìm thấy một cách chuyển động phù hợp với mình, từ những bước đi chậm rãi, những buổi tập thể thao đến những hoạt động vui chơi và kết nối cộng đồng.

Công viên Luna dành cho những khoảng lặng. Những bước tản bộ giữa màu xanh, một buổi thư giãn hay đơn giản là vài phút ngắt khỏi nhịp sống nhanh để tìm lại sự cân bằng. Stella kết hợp cảnh quan xanh với hồ bơi, mở ra một không gian có thể đáp ứng nhiều nhịp sống: vận động, vui chơi, thư giãn và tận hưởng cùng gia đình.

Công viên Sol mang đến nguồn năng lượng sôi nổi hơn với sân pickleball và bóng rổ. Tại đây, vận động đi cùng những cuộc gặp gỡ, giao lưu và tinh thần cộng đồng.

Công viên Fountain kéo dài trải nghiệm vận động theo tuyến đường xe đạp riêng men theo kênh đào nhạc nước. Hành trình rèn luyện vì thế không chỉ là những vòng chuyển động, mà còn trở thành một trải nghiệm cảnh quan giàu cảm xúc.

Trong khi đó, công viên Horizon mở ra tầm nhìn trực diện mặt nước, mang đến một không gian khoáng đạt cho chạy bộ, dạo bộ hay đơn giản là dừng lại một chút để hít thở và tái tạo năng lượng.

5 công viên, 5 sắc thái trải nghiệm, cùng tạo nên một không gian sống nơi mỗi người có thể tìm thấy nhịp chuyển động phù hợp với mình. Khi đường chạy, sân thể thao, hồ bơi và những khoảng xanh đều nằm trong tầm bước chân, việc duy trì lối sống năng động không còn là một mục tiêu xa vời hay đòi hỏi nhiều nỗ lực sắp xếp. Vận động có thể bắt đầu từ một lựa chọn nhỏ, ngay trong không gian sống quen thuộc mỗi ngày.

HỆ TIỆN ÍCH TRONG BÁN KÍNH 15 PHÚT ĐI BỘ

Một cuộc sống khỏe mạnh không chỉ đến từ việc vận động thường xuyên hay dành thời gian cho thiên nhiên, mà còn được nuôi dưỡng bởi sự thuận tiện trong những nhu cầu hằng ngày. Khi các dịch vụ thiết yếu và không gian trải nghiệm hiện diện gần nơi ở, cư dân có thêm thời gian và sự chủ động để tận hưởng cuộc sống theo cách mình mong muốn.

Đây là lợi thế SOLA được thừa hưởng từ hệ sinh thái The Global City - khu đô thị quốc tế được quy hoạch theo định hướng đô thị vị nhân sinh, với triết lý phát triển các tiện ích và dịch vụ trong bán kính 15 phút đi bộ.

Từ trung tâm thương mại quy mô 123.000 m^2, trường King's College School Wimbledon, TP.HCM, bệnh viện quốc tế, các không gian thể thao, nghệ thuật và giải trí, đến khu nhà phố thương mại SOHO cùng hệ thống kênh đào và nhạc nước, cư dân SOLA có thể tiếp cận một hệ tiện ích đa dạng ngay trong hệ sinh thái đô thị liền kề.

Khi nơi ở tạo điều kiện để những lựa chọn tích cực trở nên dễ dàng hơn, sống khỏe không còn là điều cần cố gắng theo đuổi, mà dần trở thành một phần tự nhiên của cuộc sống.

Và đó cũng là cách SOLA góp phần kiến tạo một cuộc sống đáng sống: Bắt đầu từ những điều gần gũi, hiện hữu mỗi ngày, nhưng đủ sức tạo nên khác biệt lâu dài cho chất lượng sống của mỗi cư dân.❖

Quảng Ngãi phối hợp xóa lối đi tự mở, bảo đảm an toàn đường sắt

ĐẠI THẮNG

Với sự phối hợp của chính quyền địa phương, lực lượng chức năng và ngành đường sắt, Quảng Ngãi đang đẩy nhanh tiến độ xóa lối đi tự mở, xử lý các điểm giao cắt tiềm ẩn nguy cơ tai nạn, góp phần bảo đảm an toàn chạy tàu và tính mạng người dân.

Tính đến tháng 10/2026, trên địa bàn tỉnh Quảng Ngãi còn 16 lối đi tự mở.

PHỐI HỢP XỬ LÝ TỪNG ĐIỂM GIAO CẮT

Tuyến đường sắt Bắc - Nam qua địa bàn tỉnh Quảng Ngãi dài hơn 100 km, đi qua nhiều khu dân cư, khu vực sản xuất và các tuyến đường dân sinh. Những lối đi tự mở hình thành qua thời gian, dù đáp ứng nhu cầu đi lại trước mắt, lại tiềm ẩn nguy cơ tai nạn do thiếu hệ thống cảnh báo, cần chắn và các điều kiện bảo đảm an toàn theo quy định.

Thực tế này đòi hỏi việc xử lý không thể chỉ dừng ở dựng rào chắn, mà cần sự phối hợp đồng bộ giữa lực lượng Cảnh sát giao thông (CSGT), ngành đường sắt, đơn vị quản lý hạ tầng và chính quyền địa phương.

Trong năm 2026, Quảng Ngãi tiếp tục triển khai chủ trương xóa bỏ các lối đi tự mở theo Quyết định số 358/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ. Tại nhiều địa phương, việc đóng, xóa được tổ chức sau khi các bên kiểm tra hiện trạng, đánh giá nguy cơ mất an toàn, xác định nhu cầu đi lại và thống nhất phương án xử lý.

Ngày 01/7, UBND xã Đông Sơn phối hợp với lực lượng chức năng và ngành đường sắt tổ chức rào chắn, xóa lối đi tự mở tại Km912+630 tuyến đường sắt Bắc - Nam, thuộc thôn Liên Trì Tây. Ngày 08/7, Phòng CSGT Công an tỉnh Quảng Ngãi tiếp tục phối hợp với Công ty CP Đường sắt Nghĩa Bình và chính quyền các xã Khánh Cường, Lân Phong đóng thêm hai lối đi tự mở.

Đến ngày 28/9, tại xã Tư Nghĩa, các lực lượng tiếp tục phối hợp đóng lối đi tự mở Km935+480. Đây là vị trí kết nối hai đường gom, phục vụ nhu cầu đi lại của người dân hai địa bàn Tư Nghĩa và Nghĩa Hành, nhưng có độ dốc cao, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn. Đáng chú ý, khu vực đã có lối đi khác qua đường sắt được trang bị cần chắn tự động, tạo điều kiện để tổ chức giao thông thay thế.

Theo lãnh đạo UBND các xã Tư Nghĩa, Đông Sơn, Khánh Cường, Sa Huỳnh, việc đóng, xóa vị trí này được triển khai theo kế hoạch, gắn với yêu cầu bảo đảm trật tự hành lang an toàn đường sắt và xử lý dứt điểm các lối đi tự mở.

Việc một địa phương hoàn thành đóng, xóa toàn bộ lối đi tự mở trên địa bàn cho thấy vai trò quan trọng của chính quyền cấp xã trong tổ chức thực hiện. Từ khâu xây dựng kế hoạch, phối hợp lực lượng đến tuyên truyền, vận động và quản lý sau khi rào đóng, chính quyền cơ sở là đầu mối trực tiếp giải quyết những vấn đề phát sinh tại khu dân cư.

Công tác ngăn chặn phát sinh lối đi tự mở qua đường sắt cũng là một nhiệm vụ quan trọng.

Từ những kết quả đạt được cho thấy sự quyết liệt vào cuộc của chính quyền địa phương tỉnh Quảng Ngãi trong việc xoá lối đi tự mở.

RÕ TRÁCH NHIỆM, SÁT SAO HIỆN TRƯỜNG

Một trong những yếu tố góp phần thúc đẩy tiến độ xử lý tại Quảng Ngãi là sự hướng dẫn, đôn đốc trực tiếp của Đội CSGT đường sắt số 2 (Phòng 6, Cục CSGT).

Trong các đợt công tác, lực lượng CSGT đường sắt phối hợp với CSGT địa phương, cơ quan quản lý an toàn đường sắt, ngành đường sắt và chính quyền cơ sở kiểm tra từng vị trí, đánh giá điều kiện thực tế, xác định phương án đóng, xóa hoặc đề xuất giải pháp tổ chức giao thông phù hợp.

Trung tá Trần Hải Hoàng - Phó Đội trưởng Đội CSGT đường sắt số 2, cho biết kết quả đạt được thời gian qua thể hiện sự phối hợp chặt chẽ, chủ động và trách nhiệm giữa chính quyền địa phương, lực lượng chức năng và các đơn vị quản lý hạ tầng đường sắt. Việc khảo sát thực tế, xác định nhu cầu đi lại và tính toán phương án thay thế giúp quá trình đóng, xóa phù hợp hơn, hạn chế ảnh hưởng đến sinh hoạt của người dân.

Theo Trung tá Trần Hải Hoàng, trách nhiệm của chính quyền cơ sở không kết thúc khi lối đi được rào chắn. Địa phương cần tiếp tục quản lý hiện trạng, tuyên truyền để người dân chấp hành và ngăn chặn việc tự ý phá rào, mở lại lối đi hoặc hình thành điểm giao cắt mới.

Cách tiếp cận này cũng đặt ra yêu cầu phối hợp rõ ràng hơn giữa các đơn vị: lực lượng CSGT tham gia rà soát, đánh giá nguy cơ và tham mưu phương án xử lý; cơ quan quản lý an toàn đường sắt hướng dẫn về chuyên môn; đơn vị quản lý hạ tầng tổ chức các hạng mục kỹ thuật; chính quyền địa phương chịu trách nhiệm phối hợp, vận động người dân và duy trì kết quả sau xử lý.

Đại diện Phòng CSGT Công an tỉnh Quảng Ngãi cho biết, việc rà soát nhằm đánh giá lại các vị trí còn tồn tại trên thực tế, không để lối đi tự mở tiếp tục phát sinh hoặc tái hình thành sau khi đã xử lý. Những vị trí đủ điều kiện sẽ được phối hợp đóng kín, đồng thời tăng cường tuyên truyền để người dân chuyển sang sử dụng các tuyến đường thay thế an toàn.

NGĂN TÁI PHÁT, BẢO ĐẢM AN TOÀN ĐƯỜNG SẮT

Theo kết quả rà soát được công bố trong tháng 9/2026, tại thời điểm ngày 22/9, Quảng Ngãi còn 17 lối đi tự mở qua đường sắt. Sau đó, ngày 28/9, việc đóng lối đi cuối cùng trên địa bàn xã Tư Nghĩa được hoàn thành, đưa số vị trí còn tồn tại trên toàn tỉnh xuống còn 16.

Các con số cho thấy tiến độ xử lý được thúc đẩy, song những vị trí còn lại vẫn đòi hỏi giải pháp riêng do liên quan đến đường dân sinh, hoạt động sản xuất và nhu cầu đi lại lâu năm. Tại đợt rà soát ngày 21 và 22/9, lực lượng chức năng đã đề xuất hoàn thiện thủ tục để nâng cấp 4 lối đi tự mở thành đường ngang có cảnh báo tự động. Với những vị trí không còn nhu cầu hoặc đã có tuyến thay thế phù hợp, phương án ưu tiên là đóng, xóa.

Ông Võ Quốc Anh - Trưởng phòng Quản lý an toàn đường sắt II (Cục Đường sắt Việt Nam) nhìn nhận, cần tiếp tục phối hợp với địa phương và lực lượng CSGT trong việc đánh giá điều kiện kỹ thuật, hướng dẫn giải pháp bảo đảm an toàn tại từng điểm giao cắt; đồng thời làm rõ trách nhiệm quản lý hành lang đường sắt sau khi xử lý. Đối với những vị trí chưa thể xóa ngay, việc nghiên cứu đường gom, đường ngang hợp pháp hoặc giải pháp kết nối thay thế có ý nghĩa quan trọng, tránh phát sinh lối đi mới do nhu cầu dân sinh chưa được đáp ứng.

Bên cạnh đó, công tác tuyên truyền cần được duy trì thường xuyên. Việc người dân tự ý tháo dỡ vật cản, đi qua vị trí đã đóng hoặc cố tình vượt đường sắt khi tàu đang đến gần có thể làm mất hiệu quả của các biện pháp kỹ thuật và dẫn đến hậu quả nghiêm trọng.

Xóa lối đi tự mở vì thế không chỉ là một nhiệm vụ về hạ tầng, mà còn là quá trình thay đổi thói quen đi lại và nâng cao ý thức chấp hành pháp luật. Khi chính quyền địa phương chủ động, lực lượng chức năng hướng dẫn sát thực tế, ngành đường sắt phối hợp đồng bộ và người dân đồng thuận, những điểm giao cắt nguy hiểm mới có thể được xử lý bền vững.

Mục tiêu cuối cùng không chỉ là giảm số lượng lối đi tự mở, mà là kiểm soát nguy cơ tai nạn, bảo vệ an toàn chạy tàu và tính mạng người dân trên tuyến đường sắt Bắc - Nam qua Quảng Ngãi.❖

DỰ ÁN RECAF KHÁNH HÒA:

Kết nối nguồn lực, phát triển bền vững

Lãnh đạo UBND tỉnh Khánh Hòa và các Sở, ban ngành tại Hội thảo khởi động dự án.

VĂN HÙNG

Với tổng vốn đầu tư hơn 475,5 tỷ đồng từ các nguồn tài trợ quốc tế, Dự án RECAF Khánh Hòa hướng đến giảm phát thải khí nhà kính do mất rừng và suy thoái rừng, nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu, đồng thời cải thiện sinh kế người dân, góp phần thúc đẩy phát triển bền vững tại địa phương.

Biến đổi khí hậu đang tạo ra nhiều thách thức đối với tài nguyên thiên nhiên, sản xuất nông nghiệp và đời sống người dân. Trong bối cảnh đó, kết hợp bảo vệ rừng với phát triển sinh kế bền vững có ý nghĩa quan trọng nhằm bảo tồn hệ sinh thái, nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và cải thiện chất lượng cuộc sống cho cộng đồng.

Tại Khánh Hòa, Dự án "Giảm thiểu khí thải tại khu vực Tây Nguyên và duyên hải Nam Trung Bộ Việt Nam nhằm góp phần thực hiện các mục tiêu Chương trình hành động quốc gia REDD+" (Dự án RECAF Khánh Hòa) được triển khai nhằm góp phần thực hiện những mục tiêu này.

Dự án do Ban Quản lý dự án đầu tư xây dựng tỉnh Khánh Hòa tổ chức thực hiện, với nguồn tài trợ từ Quỹ Khí hậu xanh (GCF) và Quỹ Quốc tế về Phát triển Nông nghiệp (IFAD). Tổng mức đầu tư hơn 475,5 tỷ đồng, thời gian thực hiện từ năm 2023 - 2027, trên địa bàn 12 xã.

Thông qua các hoạt động bảo vệ và quản lý bền vững tài nguyên rừng, nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và hỗ trợ phát triển sinh kế, dự án hướng đến tạo ra những chuyển biến tích cực về môi trường và kinh tế - xã hội. Trong đó, việc hỗ trợ cộng đồng, đặc biệt là những người dân có sinh kế gắn với rừng, được xem là yếu tố quan trọng để duy trì hiệu quả bảo vệ tài nguyên thiên nhiên trong dài hạn.

Điểm nổi bật của Dự án RECAF Khánh Hòa là cách tiếp cận kết hợp giữa giảm phát thải khí nhà kính, quản lý bền vững tài nguyên thiên nhiên và cải thiện đời sống người dân. Không chỉ góp phần bảo vệ hệ sinh thái, dự án còn hướng đến tạo điều kiện để cộng đồng nâng cao khả năng thích ứng trước những biến động của khí hậu, từng bước cải thiện sinh kế và tham gia tích cực hơn vào công tác quản lý, bảo vệ rừng.

Đến nay, Kế hoạch tổng thể dự án đã được nhà tài trợ và UBND tỉnh Khánh Hòa phê duyệt, tạo cơ sở để triển khai các hoạt động theo mục tiêu và kế hoạch đề ra. Ban Quản lý dự án đầu tư xây dựng tỉnh đã tổ chức hội thảo giới thiệu dự án với sự tham gia của các cơ quan, đơn vị liên quan và đại diện các địa phương trong vùng dự án. Hoạt động này góp phần phổ biến thông tin về mục tiêu, nội dung và kế hoạch thực hiện, đồng thời tăng cường sự phối hợp giữa các bên.

Song song với đó, dự án đang triển khai khảo sát, lập hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công các công trình. Ban Quản lý dự án cũng đang hoàn thiện các sổ tay quản lý, đồng thời tham gia các khóa tập huấn do nhà tài trợ tổ chức nhằm nâng cao năng lực trong các lĩnh vực quản lý tài chính, đấu thầu, giám sát và đánh giá.

Đây là những nội dung quan trọng nhằm chuẩn hóa quy trình quản lý, tăng cường tính minh bạch và bảo đảm nguồn vốn được sử dụng đúng mục tiêu, hiệu quả. Việc nâng cao năng lực chuyên môn cũng góp phần kiểm soát rủi ro, theo dõi tiến độ và kịp thời xử lý những khó khăn phát sinh trong quá trình thực hiện dự án.

Trong thời gian tới, việc tiếp tục hoàn thiện công tác chuẩn bị đầu tư, đẩy nhanh tiến độ khảo sát, thiết kế và nâng cao năng lực quản lý sẽ là những nhiệm vụ quan trọng. Đồng thời, tăng cường phối hợp giữa các cơ quan, đơn vị liên quan sẽ góp phần bảo đảm tiến độ, chất lượng và hiệu quả triển khai.

Với mục tiêu gắn kết bảo vệ rừng, ứng phó với biến đổi khí hậu và phát triển sinh kế cộng đồng, Dự án RECAF Khánh Hòa được kỳ vọng sẽ góp phần bảo tồn tài nguyên thiên nhiên, cải thiện đời sống người dân và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội theo hướng bền vững. Qua đó, dự án cũng góp phần nâng cao hiệu quả huy động, quản lý và sử dụng nguồn lực quốc tế phục vụ các mục tiêu phát triển của địa phương.❖

Di sản kiến trúc Hải Phòng - từ dấu ấn Phố Cảng đến nguồn lực phát triển

> AN NHIÊN

Cuốn sách "Di sản kiến trúc trong không gian đô thị Hải Phòng: Từ giá trị tạo thị đến nguồn lực phát triển bền vững" giới thiệu những dấu ấn kiến trúc định hình thành phố, đồng thời bàn về cách bảo tồn và sử dụng di sản phục vụ đời sống, phát triển kinh tế.

Cuốn sách do PGS.TS.KTS Trần Minh Tùng chủ biên, cùng nhóm tác giả ThS.KTS Phạm Thị Mỹ Lan, ThS. KTS Ngô Thị Hà Thanh, TS.KTS Nguyễn Quốc Đạt và ThS.KTS Trần Chí Linh (Trường Đại học Xây dựng), tập hợp các chuyên đề về lịch sử quy hoạch, đặc điểm kiến trúc và thực trạng bảo tồn, cuốn sách tìm hiểu vai trò của di sản trong quá trình hình thành đô thị Hải Phòng, từ đó bàn về cách gìn giữ và khai thác các giá trị này.

Ngoài phần dẫn luận về "giá trị tạo thị", sách gồm 3 phần: "Tạo thị Hải Phòng", "Di sản còn lại" và "Hình dung tương lai". Nội dung đi từ quá trình hình thành đô thị đến nhận diện, đánh giá hiện trạng di sản và đề xuất hướng bảo tồn, khai thác.

Trong phần dẫn luận, tác giả Nguyễn Quốc Đạt giải thích "giá trị tạo thị" là khả năng của di sản kiến trúc tạo nên một nơi chốn có bản sắc và ý nghĩa. Giá trị này gắn với hình thái không gian, ký ức lịch sử, kinh tế và đời sống xã hội. Từ cách tiếp cận đó, công trình được xem xét trong quan hệ với không gian xung quanh và cộng đồng sử dụng.

Một chuyên đề đáng chú ý là nghiên cứu của tác giả Lý Quốc Sơn, Nguyễn Thùy Dương về dấu ấn kiến trúc hậu cần và hạ tầng kỹ thuật. Các tác giả tìm đặc trưng "Phố Cảng" trong hệ thống công trình phục vụ giao thương, vận tải và sản xuất.

Dọc sông Tam Bạc và sông Cấm, những dãy nhà kho, cầu cảng được thiết kế đơn giản, ưu tiên công năng đã tạo nên diện mạo kiến trúc công nghiệp đặc trưng. Hải đăng Long Châu, Hòn Dấu, Đài thiên văn Phù Liễn và Ga Hải Phòng được nghiên cứu như những dấu mốc khoa học, kỹ thuật gắn với quá trình phát triển thành phố.

Chuyên đề dành sự chú ý cho di sản công nghiệp và kiến trúc hậu cần, những công trình thường ít được đề cập trong cách nhìn bảo tồn truyền thống. Các tác giả đề xuất giữ lớp vỏ kiến trúc, mặt đứng hướng sông và chuyển đổi công năng bên trong thành không gian sáng tạo, bảo tàng di sản hàng hải hoặc dịch vụ du lịch, thương mại.

Khả năng khai thác di sản được trình bày cụ thể hơn trong chuyên đề về phát triển kinh tế du lịch bền vững của tác giả Lý Quốc Sơn, Nguyễn Thị Nguyệt. Các tác giả đề xuất chuyển từ bảo tồn từng công trình sang xem xét tổng thể không gian, tuyến phố và quần thể kiến trúc.

Theo hướng này, công trình di sản cần kết nối với không gian đi bộ, hệ thống cây xanh và cảnh quan mặt nước sông Cấm, Tam Bạc. Những đề xuất gồm: hành trình đi bộ kiến trúc, nghệ thuật trên trục Điện Biên Phủ - Đinh Tiên Hoàng; kể câu chuyện di sản tại Ga Hải Phòng, Bưu điện Thành phố; tổ chức tuyến du lịch đường thủy và bến đón thuyền ven sông Tam Bạc.

Nghiên cứu đặt vấn đề dùng nguồn thu từ du lịch để hỗ trợ bảo tồn, duy tu công trình. Mô hình hợp tác công - tư được đề xuất nhằm phân rõ vai trò tạo lập hạ tầng của Nhà nước và khai thác dịch vụ của doanh nghiệp. Cư dân địa phương tham gia gìn giữ, giới thiệu di sản.

Với quỹ biệt thự, tác giả Nguyễn Thị Kiều Vinh và Nguyễn Thị Thanh Tùng phân tích những mâu thuẫn giữa yêu cầu bảo tồn và nhu cầu sử dụng hiện nay, đồng thời đề xuất giữ hình dáng bên ngoài, cho phép điều chỉnh nội thất theo nguyên tắc can thiệp có thể đảo ngược. Việc chuyển đổi sang công năng dịch vụ, du lịch phù hợp được xem xét để tạo kinh phí trùng tu.

Từ những công trình tạo nên dấu ấn Phố Cảng đến các đề xuất bảo tồn thích ứng, cuốn sách gợi mở cách đưa di sản vào đời sống đô thị. Giá trị kiến trúc, lịch sử cần được giữ gìn cùng với việc lựa chọn công năng và cách quản lý phù hợp, để công trình tiếp tục được sử dụng và có nguồn lực duy trì lâu dài.

Sách do NXB Xây dựng xuất bản.❖

■Ngày nhận bài: 04/9/2026 ■Ngày sửa bài: 15/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2026

Phát triển bất động sản hỗn hợp tại khu vực TOD ở Hà Nội: Tiềm năng và một số vấn đề đặt ra

Mixed-use real estate development in TOD areas in Hanoi: Potential and key issues

> **THS.NCS HOÀNG BẢO TRÂM*, THS HOÀNG HÀM MY**
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội
*Email: hbtram@hunre.edu.vn

TÓM TẮT

Phát triển bất động sản (BĐS) hỗn hợp tại khu vực phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) khai thác lợi thế tiếp cận và quỹ đất quanh nhà ga đường sắt đô thị (ĐSĐT), song các nghiên cứu trong nước mới dừng ở xếp hạng tiềm năng từng ga hoặc đo tác động của ĐSĐT tới giá nhà, chưa chỉ ra nên phát triển BĐS hỗn hợp theo cơ cấu nào. Từ khoảng trống đó, bài báo đề xuất khung phân tích cơ chế hình thành giá trị và bộ tiêu chí phân nhóm khu vực TOD cho mạng lưới ĐSĐT Hà Nội, qua đó xác định bốn nhóm ga có định hướng chức năng riêng và đề xuất cơ chế gắn quyền phát triển tăng thêm với nghĩa vụ đầu tư hạ tầng cho từng nhóm.

Từ khóa: Bất động sản hỗn hợp; phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng; TOD; đường sắt đô thị; điều tiết giá trị từ đất; Hà Nội.

ABSTRACT

Mixed-use real estate development in Transit-Oriented Development (TOD) areas leverages the accessibility benefits and land development opportunities associated with areas surrounding urban rail transit (URT) stations. However, existing studies in Vietnam have primarily focused on assessing the development potential of individual stations or estimating the effects of URT on housing prices, with limited attention to determining the appropriate mix and configuration of mixed-use real estate development. To address this gap, this paper develops an analytical framework for examining the mechanisms of value creation and proposes a set of criteria for classifying TOD areas across Hanoi's urban rail transit network. The framework identifies four station typologies with distinct functional development orientations and informs policy recommendations that link additional development rights to each station group's infrastructure investment obligations.

Keywords: Mixed-use real estate; transit-oriented development; TOD; urban railway; land value capture; Hanoi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát triển đô thị theo định hướng TOD không dừng ở việc xây dựng tuyến đường sắt mà đặt nhà ga vào quan hệ với sử dụng đất, cư trú, việc làm và dịch vụ đô thị xung quanh; hiệu quả của mô hình vì thế phải đo đồng thời bằng lượng hành khách tuyến thu hút và hiệu quả sử dụng đất vùng phụ cận [1, 2]. Bất động sản hỗn hợp giữ vai trò trung gian: khi nhà ở, văn phòng, thương mại, dịch vụ và tiện ích công cộng cùng hiện diện trong bán kính đi bộ tới nhà ga, chuyến đi bằng giao thông công cộng có thêm nhiều mục đích và nguồn thu dự án được mở rộng [5].

Điều kiện pháp lý cho hướng phát triển này tại Hà Nội đến nay bao gồm: Quyết định số 1569/QĐ-TTg xác định TOD là mô hình đô thị đặc thù của Thủ đô; Nghị quyết số 188/2025/QH15 cho phép Thành phố điều chỉnh quy hoạch khu vực TOD, thay đổi chức năng sử dụng đất và khai thác giá trị tăng thêm quanh nhà ga, khu depot [12, 13]; Nghị quyết số 318/NQ-CP cụ thể hóa thành nhiệm vụ chuẩn bị quỹ đất, bồi thường và tái định cư [15]. Yêu cầu thực tiễn càng cấp bách khi ngày 22/6/2026, Hà Nội đồng loạt khởi công 5 dự án đường sắt đô thị gắn với mô hình TOD, mục tiêu hoàn thành năm 2030 [19]. Vấn đề còn lại nằm ở khâu vận dụng: đất đai, mức độ đô thị hóa và sức mua giữa các khu vực quanh ga chênh lệch khá lớn, nên một cơ cấu BĐS hỗn hợp chung cho toàn mạng lưới khó đạt kết quả mong đợi.

Những nghiên cứu công bố gần đây trong nước tiếp cận TOD tại Hà Nội từ hai phía: xếp hạng tiềm năng từng nhà ga [9, 11], hoặc lượng hóa mức độ ĐSĐT làm thay đổi giá BĐS dọc tuyến [10], giúp xác định nơi nên ưu tiên can thiệp nhưng chưa chạm tới câu hỏi kế tiếp: tại khu vực đã chọn, nên phát triển loại hình BĐS nào, cơ cấu chức năng ra sao và dựa vào cơ chế tài chính nào. Bài viết vì vậy làm rõ tiềm năng phát triển BĐS hỗn hợp tại khu vực TOD ở Hà Nội bắt nguồn từ đâu, và cần tổ chức phát triển theo hướng nào để cân bằng hiệu quả kinh doanh, hiệu quả đầu tư giao thông và lợi ích công cộng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KHUNG PHÂN TÍCH

2.1. Tổng quan nghiên cứu

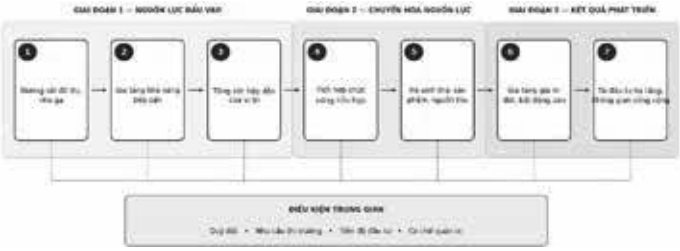
Các khung phân tích về TOD và BĐS hỗn hợp phổ biến có thể kể đến như Cervero và Kockelman xác lập liên hệ giữa mật độ, đa dạng chức năng, thiết kế đô thị với nhu cầu đi lại bằng giao thông công cộng [1]; Bertolini nhìn khu vực ga như điểm cân bằng giữa vai trò nút giao thông và chất lượng nơi chốn [2]. Ngân hàng Thế giới bổ sung trụ cột giá trị tiềm năng thị trường qua khung 3V, gắn đánh giá khu vực ga với khả năng thu hồi giá trị từ đất [3, 4]. Ở nhánh sản phẩm và tài chính, Schwanke chỉ ra tính bổ trợ giữa các chức năng trong dự án hỗn hợp [5]; Calimente mô tả cách doanh nghiệp đường sắt Tokyo mở rộng sang BĐS, bán lẻ, dịch vụ để tạo nguồn thu ngoài vé [6]; Suzuki và cộng sự hệ thống hóa công cụ thu hồi giá trị từ đất tại châu Á [7]; Rennert lưu ý tác động của nhà ga đến giá BĐS thay đổi theo loại hình vận tải và địa bàn [8].

Ở Việt Nam, Thân Đình Vinh và cộng sự vận dụng khung 3V cho 12 ga tuyến số 2A với 371 phiếu khảo sát; điểm số giữa các ga chênh lệch đáng kể, phần lớn ga có giá trị nút thấp hơn giá trị nơi chốn [9]. Bằng mô hình Hedonic cho 230 căn hộ thuộc 66 dự án dọc tuyến số 2A và số 3, Trương Thị Mỹ Thanh đo được mức giảm trung bình 12,3% của giá căn hộ trên mỗi kilômét xa thêm nhà ga [10]. Hà Văn Anh Khoa và cộng sự, từ góc nhìn node-place, cảnh báo việc đồng nhất có metro với đã hình thành TOD [11]. Ở phạm vi rộng hơn, Lê Nguyễn Ngọc Hải cũng tổng quan các yếu tố quy hoạch ảnh hưởng đến hiệu quả đầu tư TOD tại TP.HCM, cho thấy câu hỏi về cơ cấu sản phẩm sau khi xác định tiềm năng không chỉ đặt ra ở Hà Nội [20]. Như vậy, cơ sở đánh giá tiềm năng và bằng chứng vốn hóa giá trị hạ tầng vào giá đất đã tương đối đầy đủ; điều còn bỏ ngỏ là nên chọn cơ cấu sản phẩm nào và ràng buộc nghĩa vụ hạ tầng ra sao cho một khu vực TOD đã xác định có tiềm năng.

2.2. Khung phân tích cơ chế hình thành giá trị

Ardila-Gomez và cộng sự mô tả BĐS hỗn hợp tại khu vực TOD như tổ hợp công trình gắn với nhà ga, trong đó nhà ở, văn phòng, thương mại, dịch vụ và tiện ích công cộng cùng tồn tại trong phạm vi tiếp cận thuận tiện bằng đi bộ hoặc phương tiện trung chuyển [4].

Kết hợp cách tiếp cận chuỗi giá trị của Schwanke [5], kinh nghiệm tại Tokyo [6] và các công cụ thu hồi giá trị của Suzuki và cộng sự [7], bài báo dựng khung phân tích bảy bước theo quan hệ nhân quả, chia thành ba giai đoạn (Hình 1). Ba bước đầu là nguồn lực đầu vào: hạ tầng ĐSĐT và nhà ga làm tăng khả năng tiếp cận, kéo theo sức hấp dẫn của vị trí đất quanh ga. Bước 4 và 5 là giai đoạn chuyển hóa, khi các chức năng được tích hợp thành hệ sinh thái sản phẩm cùng nguồn thu nuôi lẫn nhau [6]. Hai bước cuối phản ánh kết quả: giá trị đất và BĐS quanh ga tăng lên, tạo nguồn lực tái đầu tư hạ tầng [7]. Chi phối cả chuỗi là bốn điều kiện trung gian: quỹ đất, nhu cầu thị trường, tiến độ đầu tư và cơ chế quản trị.



Hình 1. Cơ chế hình thành giá trị của BĐS hỗn hợp tại khu vực TOD. *(Nguồn: Tác giả xây dựng trên cơ sở tổng hợp từ [5 - 7])*

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Phạm vi nghiên cứu và bối cảnh áp dụng

Phạm vi không gian tham chiếu lấy theo bán kính 500 m quanh nhà ga, tương ứng ngưỡng đi bộ thuận tiện trong nghiên cứu TOD [1, 4] và gần với vùng phục vụ 400 m theo mạng đường áp dụng cho tuyến số 2A [9]; ranh giới vùng phụ cận thực tế do quy hoạch chi tiết xác định theo Luật Thủ đô [14].

Trên thực địa, tuyến số 2A (Cát Linh - Hà Đông, khoảng 13 km) vận hành từ tháng 11/2021, qua các ga khu dân cư Văn Quán, Hà Đông, La Khê, Văn Khê trước khi kết thúc tại Yên Nghĩa. Tuyến số 3 (Nhổn - Ga Hà Nội, khoảng 12,5 km) khai thác đoạn trên cao Nhổn - Cầu Giấy từ tháng 8/2024, đoạn ngầm qua Kim Mã, Cát Linh, Ga Hà Nội đang thi công [17]. Tuyến số 5 (Văn Cao - Hòa Lạc, khoảng 39,6 km) khởi công tháng 12/2025 với hai depot tại Sơn Đồng - Dương Hòa và Hòa Lạc [18]. Đợt khởi công tháng 6/2026 bổ sung năm tuyến nữa, phần lớn đi ngầm và gắn với mô hình TOD [19]. Bài báo giới hạn phân tích ở ba tuyến đầu, nơi đã có dữ liệu vận hành và công bố.

3.2. Tiêu chí phân nhóm khu vực TOD

Để xây dựng các tiêu chí, bài báo lựa chọn bốn dấu hiệu quan sát được từ dữ liệu thứ cấp: vai trò nhà ga, mức độ đô thị hóa vùng phụ cận, đặc điểm quỹ đất và tiến độ tuyến. Ba dấu hiệu đầu cho biết dư địa bố trí chức năng và chi phí tạo lập quỹ đất; dấu hiệu thứ tư quyết định cách phân kỳ dự án. Riêng mức độ đô thị hóa, chênh lệch giữa các nhóm khá rõ trên thực tế: mật độ dân số khu vực Đống Đa, nơi có ga Cát Linh, đạt khoảng 38.000 người/km^2, cao hơn nhiều lần mức bình quân khu vực nông thôn ngoại thành Hà Nội, khoảng 1.400 người/km^2 [21]. Kết quả áp dụng cho mạng lưới ĐSĐT Hà Nội được trình bày tại Bảng 1.

Bảng 1. Tiêu chí phân nhóm khu vực TOD và kết quả áp dụng cho mạng lưới ĐSĐT Hà Nội (Nguồn: Tác giả tổng hợp từ [9], [17 - 19])

Tiêu chí	Nhóm 1: Ga trung tâm, chuyển tuyến	Nhóm 2: Ga khu dân cư	Nhóm 3: Ga đầu cuối	Nhóm 4: Khu depot
Vai trò trong mạng lưới	Ga chuyển tuyến, khu lõi	Ga trung gian trên tuyến	Ga đầu, cuối tuyến	Depot, vùng phụ cận
Mức độ đô thị hóa	Cao	Trung bình	Trung bình - thấp	Thấp
Đặc điểm quỹ đất	Phân tán, nhiều chủ	Thửa nhỏ, xen kẽ khu ở	Liền khoảnh, quy mô vừa	Tập trung, quy mô lớn
Tiến độ tuyến	Khai thác, sắp hoàn thành	Đang khai thác	Đang khai thác	Đang thi công
Ga đại diện	Cát Linh, Cầu Giấy, Kim Mã, Ga Hà Nội	Văn Quán, Hà Đông, La Khê, Văn Khê	Yên Nghĩa, Nhổn	Sơn Đồng - Dương Hòa, Hòa Lạc

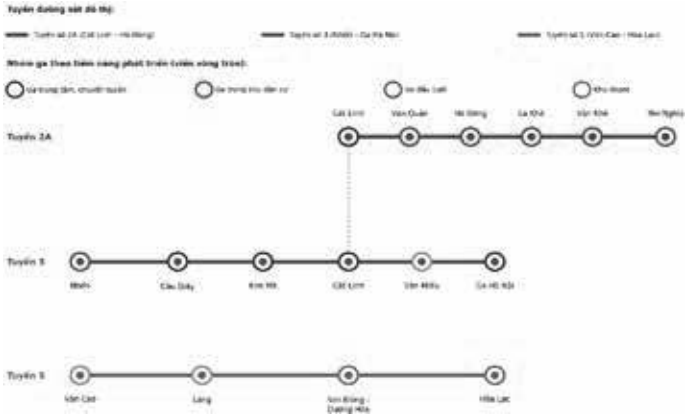
3.3. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo sử dụng phương pháp nghiên cứu định tính qua ba bước: (i) tổng hợp văn bản pháp lý về TOD và sử dụng đất tại Hà Nội [12 - 16] để xác định giới hạn quyền phát triển và cơ chế điều tiết giá trị; (ii) tổng thuật nghiên cứu quốc tế, trong nước [1 - 11], [20] nhằm dựng khung phân tích; (iii) đối chiếu bộ tiêu chí tại Bảng 1 với dữ liệu thứ cấp về vị trí ga và tiến độ tuyến [17 - 19], [21]. Bài báo không khảo sát sơ cấp mà dẫn lại số liệu giá đất, hành khách từ công bố đã có [9, 10].

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Phân nhóm khu vực TOD tại Hà Nội

Đối chiếu với bộ tiêu chí tại Bảng 1 với ba tuyến ĐSĐT, các khu vực TOD của Hà Nội tách thành bốn nhóm như Hình 2. Mỗi nhóm mạnh ở một mặt và yếu ở mặt còn lại: nơi có mật độ hoạt động cao thì quỹ đất hạn hẹp, còn nơi dồi dào quỹ đất thì thị trường chưa hình thành - sự bù trừ này quyết định cơ cấu chức năng phù hợp cho từng nhóm.



Hình 2. Sơ đồ các tuyến ĐSĐT Hà Nội và bốn nhóm ga theo Bảng 1.
(Sơ đồ minh họa thứ tự các ga, không thể hiện tỷ lệ và vị trí địa lý thực tế. Nguồn: Tác giả tổng hợp từ [17 - 19].)

4.2. Tiềm năng phát triển BĐS hỗn hợp

Tiềm năng đầu tiên nằm ở khả năng mở rộng không gian phát triển. Khi thời gian tới nơi làm việc và dịch vụ được rút ngắn, tương quan vị trí giữa các khu vực thay đổi và khu vực quanh ga có thêm điều kiện thu hút dân cư, kinh doanh cùng vốn đầu tư. Mức thay đổi không đồng đều: theo Rennert, nó phụ thuộc loại hình vận tải và địa bàn [8], còn xếp hạng 3V trên tuyến số 2A cho thấy khoảng cách đáng kể giữa các ga trong cùng tuyến [9], vậy nên đánh giá tiềm năng phải bám vào vai trò từng nhà ga.

Tiềm năng thứ hai là hệ sinh thái sản phẩm và nguồn thu. Lượng hành khách chưa tự tạo ra giá trị kinh doanh; giá trị chỉ xuất hiện khi nhu cầu đi lại được nối với hoạt động cư trú, làm việc và tiêu dùng tại chỗ. Tokyo là ví dụ rõ: mở rộng sang BĐS, bán lẻ và dịch vụ vừa tạo nguồn thu ngoài vé, vừa làm khu vực ga hấp dẫn hơn [6]. Hà Nội đã có dòng khách ổn định trên tuyến số 2A và đoạn trên cao tuyến số 3, song khảo sát tại 12 ga tuyến số 2A ghi nhận mức hài lòng về dịch vụ và tiếp cận còn thấp [9], cho thấy chức năng phụ trợ quanh ga còn nhiều việc phải làm.

Tiềm năng thứ ba là phần giá trị tăng thêm có thể huy động trở lại cho hạ tầng. Hong Kong và Tokyo đã dùng công cụ giao đất, cho thuê quyền phát triển và hợp tác giữa đơn vị đường sắt với doanh nghiệp BĐS [7], với điều kiện là chứng minh được mức vốn hóa giá trị hạ tầng vào giá đất; ở Hà Nội, mỗi km xa thêm nhà ga, giá căn hộ dọc tuyến số 2A và số 3 giảm trung bình 12,3% [10]; đây chính là phần mà cơ chế điều tiết giá trị có thể hướng tới.

4.3. Một số vấn đề đặt ra

Trở ngại đầu tiên thuộc về quỹ đất và tổ chức không gian. Bốn nhóm ga tại Bảng 1 khác nhau đến mức khó áp dụng một cơ chế quy hoạch thống nhất. Ở nhóm ga trung tâm, ga chuyển tuyến, đất xen cài giữa các công trình hiện hữu và thuộc nhiều chủ sử dụng khác nhau, làm gia tăng chi phí tập hợp đất, bồi thường và tái định cư. Nhóm ga đầu cuối và khu depot thì ngược lại: việc bố trí các dự án quy mô lớn thuận lợi hơn, song hiệu quả phát triển phụ thuộc vào dân cư, việc làm và hạ tầng kết nối được hình thành trong các giai đoạn tiếp theo. Nghị quyết số 188/2025/QH15 đã tạo cơ sở pháp lý cho việc điều chỉnh quy hoạch [13], nhưng nếu thiếu phương án tổ chức lại đất đai và phân kỳ đầu tư hợp lý, mật độ xây dựng có thể vượt quá khả năng đáp ứng của hạ tầng.

Trở ngại thứ hai nằm ở cơ cấu sản phẩm và sự đồng bộ tiến độ. Một cơ cấu sản phẩm chung áp cho các khu vực có sức mua khác nhau có thể đem lại doanh thu ngắn hạn nhưng không tạo đủ việc làm và nhu cầu đi lại trong ngày [11]. Độ lệch tiến độ giữa đường sắt, hạ tầng kết nối và dự án BĐS cũng ảnh hưởng khả năng hấp thụ: dự án hoàn thành khi tuyến chưa vận hành ổn định thì lợi thế tiếp cận chưa đủ tạo thị trường; ngược lại, nhà ga đã khai thác mà công trình phụ trợ chậm thì dòng khách khó chuyển thành nhu cầu thương mại.

Trở ngại thứ ba thuộc về phân chia giá trị và năng lực quản trị. Giá trị tăng thêm quanh nhà ga do cả đầu tư công, điều chỉnh quy hoạch lẫn năng lực kinh doanh của nhà đầu tư tạo ra, và ba phần này cần tách bạch. Cơ chế điều tiết thiếu rõ ràng khiến Nhà nước khó thu hồi nguồn lực cho hạ tầng; ngược lại, nghĩa vụ tài chính quá cao sẽ làm dự án mất khả thi. Luật Thủ đô năm 2026 đã trao HĐND Thành phố thẩm quyền quy định các khoản thu [14]; phần còn thiếu là dữ liệu về giá đất và chi phí hạ tầng.

5. KIẾN NGHỊ

5.1. Định hướng mô hình phát triển theo nhóm ga

Từ bốn nhóm ga trong Bảng 1 và những trở ngại nêu trên, định hướng cơ cấu chức năng cho từng nhóm được thể hiện trong Hình 3, theo nguyên tắc lựa chọn chức năng phù hợp với dư địa quỹ đất và mức độ trưởng thành của thị trường, đồng thời gắn phần phát triển tăng thêm với nghĩa vụ đầu tư hạ tầng phục vụ nhà ga.

Hình 3. Định hướng mô hình BĐS hỗn hợp theo bốn nhóm ga ĐSĐT Hà Nội. *(Nguồn: Tác giả đề xuất trên cơ sở Bảng 1 và các tài liệu [12 - 14].)*

Ở nhóm ga trung tâm, chuyển tuyến, quỹ đất phân tán khiến thu hồi diện rộng ít khả thi; hướng phù hợp hơn là chỉnh trang theo ô phố, hợp khối thửa nhỏ và tận dụng quỹ đất công xen cài. Nhóm ga khu dân cư nên dừng ở phát triển hỗn hợp quy mô vừa, mật độ kiểm soát theo năng lực hạ tầng sẵn có. Nhóm ga đầu cuối cần phân kỳ theo lượng hành khách, ưu tiên trung chuyển trước khi mở rộng sang nhà ở, thương mại. Riêng khu depot tuyến số 5, quỹ đất tập trung cho phép chuẩn bị trước quy hoạch và hạ tầng khung, rồi giao đất theo giai đoạn thi công.

5.2. Gắn quyền phát triển với nghĩa vụ đầu tư hạ tầng

Luật Thủ đô số 02/2026/QH16 cùng Nghị quyết số 71/2025/NQ-HĐND đã cho phép Thành phố quy định các khoản thu từ diện tích

sàn tăng thêm và giá trị tăng thêm từ đất [14, 16]. Để vận hành, ba nội dung cần công khai: nguyên tắc xác định nghĩa vụ tài chính, phương pháp định giá đất trước và sau điều chỉnh quy hoạch, và mục đích sử dụng nguồn thu. Quyền phát triển tăng thêm phải gắn nghĩa vụ đầu tư hạ tầng tương ứng, ghi trong quyết định chấp thuận chủ trương đầu tư và hồ sơ lựa chọn nhà đầu tư, thay cho thỏa thuận riêng lẻ từng dự án. Mức điều tiết nên khác nhau giữa các nhóm: ở nhóm ga trung tâm, chuyển tuyến, nơi mức vốn hóa giá trị vào giá nhà đã được đo cụ thể [10], tỷ lệ điều tiết có thể cao hơn; ở nhóm ga đầu cuối và khu depot, thị trường chưa hình thành, cần lộ trình theo giai đoạn.

5.3. Tổ chức điều phối, dữ liệu và giám sát thực hiện

Số lượng chủ thể tham gia phát triển TOD đòi hỏi đầu mối điều phối cho từng tuyến hoặc cụm ga thí điểm, đủ thẩm quyền thống nhất kế hoạch điều chỉnh quy hoạch, chuẩn bị quỹ đất và chọn dự án ưu tiên; thiếu đầu mối này, khu vực ga dễ bị chia nhỏ, rời rạc. Đi kèm là bộ dữ liệu dùng chung gồm hiện trạng thửa đất, chủ sử dụng, giá đất, lưu lượng hành khách và nhu cầu BĐS, làm cơ sở định giá và giám sát. Hồ sơ lựa chọn nhà đầu tư cần nêu rõ phần hạ tầng công cộng, tỷ lệ nhà ở phù hợp khả năng chi trả và nghĩa vụ kết nối với nhà ga, kèm công khai tiến độ thực hiện.

6. KẾT LUẬN

Phát triển BĐS hỗn hợp tại khu vực TOD là hướng đi phù hợp với giai đoạn Hà Nội mở rộng nhanh mạng lưới đường sắt đô thị. Kế thừa các khung phân tích quốc tế cùng các nghiên cứu đã công bố trong nước, bài báo đã xây dựng khung phân tích bảy bước về cơ chế hình thành giá trị, đi từ hạ tầng nhà ga đến khả năng tiếp cận, cơ cấu chức năng hỗn hợp và phần giá trị tăng thêm có thể huy động trở lại cho hạ tầng. Bộ tiêu chí phân nhóm được đề xuất trên vai trò nhà ga, mức độ đô thị hóa vùng phụ cận, đặc điểm quỹ đất và tiến độ tuyến; đối chiếu với mạng lưới ĐSĐT Hà Nội, các khu vực TOD tách thành bốn nhóm có dư địa và ràng buộc khác nhau. Bài báo đề xuất chọn cơ cấu chức năng riêng cho từng nhóm ga thay cho một mô hình chung, gắn quyền phát triển tăng thêm với nghĩa vụ đầu tư hạ tầng theo cơ chế điều tiết giá trị mà Luật Thủ đô số 02/2026/QH16 và Nghị quyết số 71/2025/NQ-HĐND đã quy định [14, 16], đồng thời gợi mở hướng lượng hóa bộ tiêu chí bằng các chỉ báo đo được theo từng khu vực ga, phục vụ triển khai TOD gắn với phát triển đô thị bền vững của Thủ đô.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. Cervero and K. Kockelman. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 2, no. 3, pp. 199-219, 1997, doi: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6.

[2] L. Bertolini. Spatial development patterns and public transport: The application of an analytical model in the Netherlands. Transport Policy, vol. 6, no. 4, pp. 199-210, 1999.

[3] World Bank. Transforming the Urban Space through Transit-Oriented Development: The 3V Approach. Washington, DC, 2017.

[4] A. Ardila-Gomez, O. S. Namkung, K. Dominguez-Gonzalez, H. He and N. Bona. Planning for Transit-Oriented Development in Emerging Cities. World Bank, Washington, DC, 2024, doi: 10.1596/42222.

[5] D. Schwanke. Mixed-Use Development Handbook, 2nd ed. Urban Land Institute, Washington, DC, 2003.

[6] J. Calimente. Rail integrated communities in Tokyo. Journal of Transport and Land Use, vol. 5, no. 1, pp. 19-32, 2012, doi: 10.5198/jtlu.v5i1.280.

[7] H. Suzuki, J. Murakami, Y.-H. Hong and B. Tamayose. Financing Transit-Oriented Development with Land Values: Adapting Land Value Capture in Developing Countries. World Bank, Washington, DC, 2015, doi: 10.1596/978-1-4648-0149-5.

[8] L. Rennert. A meta-analysis of the impact of rail stations on property values: Applying a transit planning lens. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 163, pp. 165-180, 2022, doi: 10.1016/j.tra.2022.06.013.

[9] Thân Đình Vinh, Đặng Thị Nga, Lê Văn Chè. Ứng dụng khung 3V của Ngân hàng Thế giới trong đánh giá tiềm năng TOD quanh các ga thuộc tuyến đường sắt đô thị số 2A Hà Nội. Tạp chí Xây dựng, số 04, tr. 74-79, 2026.

[10] Trương Thị Mỹ Thanh. Khả năng tiếp cận đường sắt đô thị và sự gia tăng giá trị bất động sản dọc tuyến: Bằng chứng thực nghiệm cho phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng tại Hà Nội. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, tập 77, số 6, tr. 774-788, 2026, doi: 10.47869/tcsj.77.6.2.

[11] Hà Văn Anh Khoa, Nguyễn Việt Huy, Hoàng Nguyên Tùng. Đường sắt đô thị Hà Nội: Cơ hội lịch sử và thách thức bản địa hóa mô hình phát triển theo giao thông công cộng (TOD) tại Việt Nam. Tạp chí Kiến trúc, số 07, 2026.

[12] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1569/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch Thủ đô Hà Nội thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Hà Nội, 2024.

[13] Quốc hội. Nghị quyết số 188/2025/QH15 về thí điểm cơ chế, chính sách đặc thù phát triển mạng lưới đường sắt đô thị tại Hà Nội, TP.HCM, 2025. Internet: https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Giao-thong-Van-tai/Nghi-quyet-188-2025-QH15-644641.aspx (truy cập: tháng 9/2026).

[14] Quốc hội. Luật Thủ đô số 02/2026/QH16. Hà Nội, 2026.

[15] Chính phủ. Nghị quyết số 318/NQ-CP ban hành Kế hoạch triển khai Nghị quyết số 188/2025/QH15 của Quốc hội, Hà Nội, 2025.

[16] Hội đồng nhân dân TP Hà Nội. Nghị quyết số 71/2025/NQ-HĐND quy định chi tiết về lập, thẩm định, phê duyệt, điều chỉnh quy hoạch khu vực TOD, Hà Nội, 2025.

[17] Công ty TNHH MTV Đường sắt Hà Nội (Hanoi Metro). Quy hoạch mạng lưới Metro TP Hà Nội. Internet: https://metrohanoi.vn/metro-network/quy-hoach-mang-luoi-metro-thanh-pho-ha-noi (truy cập: tháng 02/2026).

[18] Cổng Thông tin điện tử Chính phủ. Khởi công tuyến đường sắt đô thị số 5, Văn Cao - Hòa Lạc, 19/12/2025. Internet: https://thanglong.chinhphu.vn/khoi-cong-tuyen-duong-sat-do-thi-so-5-van-cao-hoa-lac-103251219150641848.htm (truy cập: tháng 8/2026).

[19] Cổng Thông tin điện tử Chính phủ. Thủ tướng dự lễ khởi công 5 tuyến đường sắt đô thị và 3 dự án nhà ở cho thuê tại Hà Nội, 22/6/2026. Internet: https://baochinhphu.vn/thu-tuong-du-le-khoi-cong-5-tuyen-duong-sat-3-du-an-nha-o-cho-thue-tai-ha-noi-voi-tong-von-hon-13-trieu-ty-dong-102260622090233108.htm (truy cập: tháng 8/2026).

[20] Lê Nguyễn Ngọc Hải. Nghiên cứu các yếu tố của quy hoạch đô thị ảnh hưởng đến hiệu quả đầu tư xây dựng TOD: Tổng quan nghiên cứu trên thế giới và khả năng ứng dụng tại TP.HCM. Tạp chí Xây dựng, số 07, tr. 104-107, 2026.

[21] Cục Thống kê TP Hà Nội. Niên giám thống kê TP Hà Nội. Internet: https://thongkehanoi.nso.gov.vn (truy cập: tháng 8/2026).

■Ngày nhận bài: 20/8/2026 ■Ngày sửa bài: 04/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 14/9/2026

Sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP Hồ Chí Minh trong bối cảnh mới

Transformation of Ho Chi Minh City's urban spatial structure in the new context

> KTS CAO THÀNH NGHIỆP[1,*], GS.TS.KTS NGUYỄN QUỐC THÔNG[2], TS.KTS PHẠM NGỌC TUẤN[3]
[1]Viện Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Kiến trúc TP Hồ Chí Minh
[2]Hội Kiến trúc sư Việt Nam
[3]Khoa Quy hoạch, Trường Đại học Kiến trúc TP Hồ Chí Minh
[*]Email: ktscaothanhnghiep@gmail.com

TÓM TẮT

TP.HCM hình thành trên nền sông rạch tự nhiên, từ các điểm cư trú - giao thương liên kết bằng đường thủy, trước khi định hình cấu trúc lưỡng cực Sài Gòn - Chợ Lớn và đô thị đơn tâm. Quá trình đô thị hóa, phát triển hạ tầng và chuyển đổi sử dụng đất đã thúc đẩy cấu trúc đô thị chuyển sang đa cực, đa hành lang, gây phân mảnh không gian và xung đột với nền tảng tự nhiên. Trong bối cảnh hình thành TP.HCM mới, nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích lịch sử - không gian, chồng lớp bản đồ và đối chiếu quy hoạch với thực tế theo bảy tiêu chí. Kết quả xác định các quy luật: kế thừa và chồng lớp lịch sử; mở rộng theo hành lang; chuyển từ đơn tâm sang đa cực; tái phân bố chức năng dân cư và việc làm; lệch pha giữa quy hoạch với thực hiện; tích hợp không gian vùng. Nghiên cứu đề xuất phát triển đa trung tâm có kiểm soát, gắn với giao thông công cộng, bảo tồn cấu trúc tự nhiên - lịch sử và điều phối toàn đô thị.

Từ khoá: Cấu trúc không gian đô thị; biến đổi cấu trúc đô thị; hình thái đô thị; đô thị đa cực; TP.HCM.

ABSTRACT

Ho Chi Minh City initially developed on a natural river-and-canal network, with settlement and trading nodes connected by waterways, before evolving into the bipolar spatial structure of Saigon-Cho Lon and subsequently a monocentric urban form. Urbanization, infrastructure development, and land-use conversion have driven its transition toward a polycentric, multi-corridor structure, while also intensifying spatial fragmentation and conflicts with the natural setting. In the context of the newly expanded Ho Chi Minh City, this study employs historical-spatial analysis, map overlay, and comparison between statutory planning and actual development based on seven criteria. The findings identify several transformation patterns: historical continuity and layering; corridor-based expansion; transition from a monocentric to a polycentric structure; redistribution of functions, population, and employment; temporal mismatch between planning and implementation; and regional spatial integration. The study proposes a controlled polycentric development model integrated with public transport, the conservation of natural and historical structures, and coordinated citywide development.

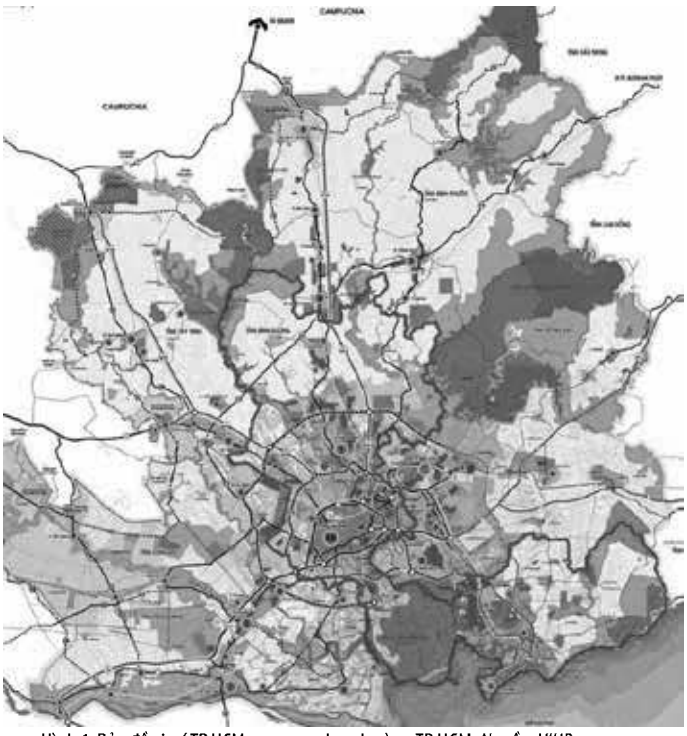
Keywords: Urban spatial structure; urban structural transformation; urban morphology; polycentric city; Ho Chi Minh City.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TP.HCM hình thành trên nền sông rạch tự nhiên, từ các điểm cư trú, chợ và bến thuyền liên kết bằng giao thông đường thủy. Trong Gia Định thành thông chí, Trịnh Hoài Đức miêu tả cảnh quan đô hội ven sông Bình Dương, tức sông Sài Gòn: "Sông Bình Dương rộng 40 tầm, sâu 6 tầm, thuyền bè đi lại liền bánh lái, nối mũi nhau. Ở đây phố sá trù mật, nhà ngói san sát, dọc theo bờ sông nước. Thật là một nơi đô hội tụ họp của bốn phương vậy" [1]. Sông rạch vừa là nền tảng tự nhiên, vừa là mạng giao thông và trục tổ chức các hạt nhân Bến Nghé, Sài Gòn, Chợ Lớn [2, 3].

Từ cuối thế kỷ 19, mạng đường ô bàn cờ, công trình hành chính và cảng được thiết lập trên cấu trúc bản địa. Sau Đổi mới, gia tăng dân số, công nghiệp hóa, chuyển đổi đất và đầu tư hạ tầng thúc đẩy không gian xây dựng mở rộng từ lõi Sài Gòn - Chợ Lớn ra các trục đối ngoại, khu công nghiệp và khu đô thị mới. Các quy hoạch chung năm 1993, 1998 và 2010 chuyển dần từ đơn tâm mở rộng sang đa hướng, đa cực [4, 6]. Tuy nhiên, trung tâm mới, dân cư, việc làm và giao thông công cộng phát triển thiếu đồng bộ. Đất giao thông chỉ chiếm khoảng 12,8% đất xây dựng đô thị, vận tải công cộng đáp ứng khoảng 7% số chuyến đi và đường sắt đô thị đang khai thác đạt khoảng 1,9% chiều dài định hướng [8, 9].

Theo Nghị quyết số 202/2025/QH15 của Quốc hội, TP.HCM sau sắp xếp có diện tích 6.772,59 km^2, dân số 14.002.598 người và 168 đơn vị hành chính cấp xã [7]. Không gian mới tích hợp lõi tài chính - dịch vụ và đổi mới sáng tạo, chuỗi công nghiệp - đô thị phía Bắc, cùng hệ thống cảng biển - logistics và đô thị hướng biển phía Đông Nam. Đây là quá trình tích hợp ba cấu trúc có nguồn gốc, chức năng, mật độ và mức độ phát triển khác nhau.



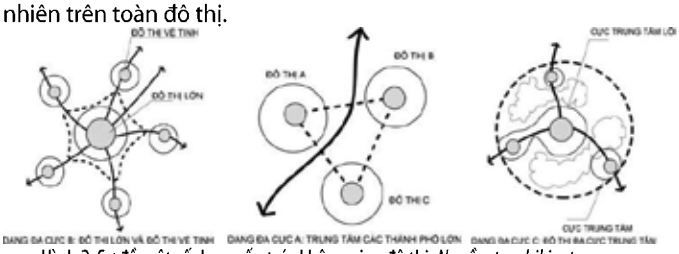
Hình 1. Bản đồ vị trí TP.HCM trong quy hoạch vùng TP.HCM. *Nguồn: VIUP*

Các nghiên cứu và đồ án trước đây chủ yếu xem xét từng địa phương, giai đoạn hoặc thành phần riêng biệt. Chưa có khung thống nhất để đối chiếu cấu trúc quy hoạch của TP.HCM sau hợp nhất. Bài báo phân tích quá trình biến đổi từ năm 1698 đến nay bằng phương pháp lịch sử - không gian, hình thái đô thị, chồng lớp bản đồ và đối chiếu quy hoạch với thực tế theo bảy nhóm tiêu chí; qua đó nhận diện thành phần kế thừa, đứt gãy, động lực và quy luật biến đổi, làm cơ sở định hướng cấu trúc không gian.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khái niệm cấu trúc không gian đô thị

Theo Bertaud, cấu trúc không gian đô thị (urban spatial structure) thể hiện sự phân bố dân cư, việc làm, mật độ và sử dụng đất, được liên kết bằng mạng giao thông và các dòng di chuyển [10]. OECD nhận diện cấu trúc đô thị qua mật độ dân cư, các lõi tập trung và phạm vi đi lại lao động [11]; UN-Habitat nhấn mạnh quan hệ tích hợp giữa sử dụng đất, giao thông, hạ tầng, không gian công cộng và nền tảng tự nhiên [12]. Trong nghiên cứu này, cấu trúc không gian đô thị TP.HCM được hiểu là phương thức tổ chức và liên kết hệ thống trung tâm, khu vực chức năng, sử dụng đất, dân cư - việc làm, giao thông, không gian mở, cấu trúc lịch sử - văn hóa và nền tảng tự nhiên trên toàn đô thị.



Hình 2. Sơ đồ một số dạng cấu trúc không gian đô thị. *Nguồn: tapchikientruc.com.vn*

Nhận diện cấu trúc phải xác định vị trí, quy mô, chức năng, cấp bậc, phạm vi phục vụ và quan hệ vận hành của từng thành phần. Theo Christaller, trung tâm được phân cấp theo chức năng và phạm vi cung cấp hàng hóa, dịch vụ [13]. Lý thuyết đô thị mạng lưới giải thích quan hệ giữa các nút, tuyến và dòng vận động [14]. Các khái niệm trung tâm, cực và hành lang vì vậy được dùng để đánh giá quá trình chuyển từ đơn tâm sang đa cực và mức độ liên kết giữa các trung tâm.

Sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị (urban spatial transformation) là thay đổi theo thời gian về vị trí, quy mô, chức năng, mật độ, cấp bậc và quan hệ giữa các thành phần [15]. Nghiên cứu phân biệt: cấu trúc quy hoạch thể hiện ý đồ của đồ án; cấu trúc hình thành phản ánh các thành phần đã xây dựng; cấu trúc vận hành thể hiện phân bố dân cư, việc làm, dịch vụ và dòng giao thông. Theo cách tiếp cận đánh giá mức độ phù hợp và hiệu quả thực hiện quy hoạch (conformance-performance) của Alexander và Faludi, việc đối chiếu ba lớp cấu trúc cho phép xác định mức độ hiện thực hóa đồ án và độ lệch giữa quy hoạch với thực tế phát triển [16].

2.2. Khung nhận diện sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM

Khung nhận diện được xây dựng từ hình thái học đô thị của Conzen và Moudon [17,18], lý thuyết vị trí trung tâm [13], đô thị mạng lưới [14] và tiếp cận tích hợp sử dụng đất - giao thông [19]. Bảy nhóm tiêu chí gồm:

(1) vị trí địa lý và nền tảng tự nhiên - sinh thái;
(2) sử dụng đất và mức độ đô thị hóa;
(3) hệ thống trung tâm và khu vực chức năng;
(4) phân bố dân cư - kinh tế - việc làm;
(5) giao thông và khả năng tiếp cận;
(6) không gian mở và cấu trúc lịch sử - văn hóa;
(7) quy hoạch, pháp luật, quản lý và mức độ thực hiện.

Các tiêu chí được tổ chức thành ba lớp:

- Lớp nền tảng hình thành và giới hạn phát triển;
- Lớp tổ chức không gian và hoạt động đô thị;
- Lớp tác động và kiểm soát của quy hoạch, pháp luật, đầu tư, quản lý.

Mỗi giai đoạn được phân tích theo chuỗi trạng thái đầu kỳ - động lực - biểu hiện biến đổi - trạng thái cuối kỳ - vấn đề phát sinh. Kết quả được nhận diện theo bốn trạng thái: kế thừa, thích ứng, tích hợp hoặc suy giảm - đứt gãy.

2.3. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

Dữ liệu gồm bản đồ lịch sử, địa hình, sử dụng đất và quy hoạch; ảnh viễn thám, GIS; số liệu dân số, việc làm, giao thông, không gian mở; văn bản pháp luật, khảo sát thực địa và nghiên cứu chuyên ngành.

Phân tích lịch sử - không gian được dùng để phân kỳ quá trình từ năm 1698 đến nay. Bản đồ được chuẩn hóa về phạm vi, hệ tọa độ và tỷ lệ, sau đó chồng lớp bằng GIS để xác định hướng và mức độ biến đổi của đất xây dựng, trung tâm, giao thông và không gian mở.

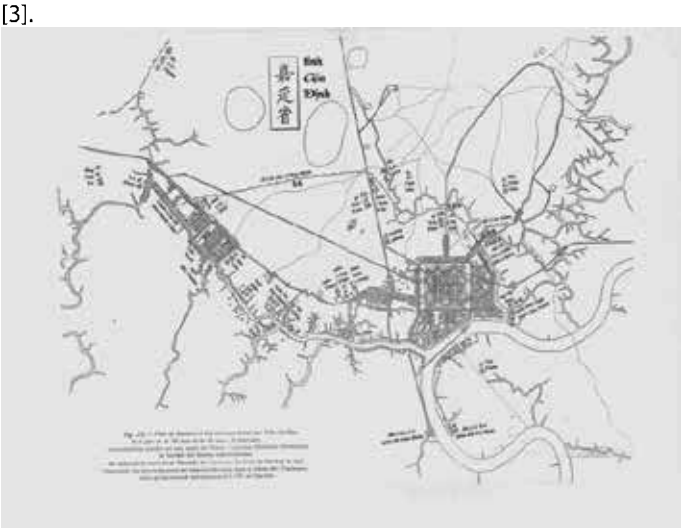
So sánh - đánh giá được thực hiện theo bảy tiêu chí giữa các giai đoạn, ba khu vực trước sắp xếp và ba lớp cấu trúc. Kết quả bản đồ được đối chiếu với thống kê, khảo sát và ý kiến chuyên gia để xác định thành phần kế thừa, hình thành mới, suy giảm; từ đó tổng hợp động lực và quy luật biến đổi.

3. SỰ BIẾN ĐỔI CẤU TRÚC KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ TP.HCM TRONG BỐI CẢNH MỚI

3.1. Quá trình hình thành và biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM

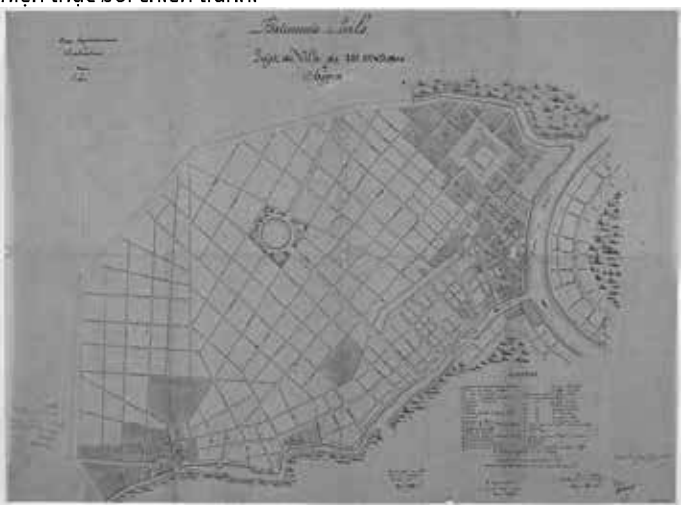
Giai đoạn 1698 - 1859: Đô thị hình thành trên vùng chuyển tiếp từ thềm phù sa cổ Bình Dương, cao trung bình +10 đến +15 m, xuống bình nguyên thấp Sài Gòn, phổ biến +0,5 đến +1,5 m. Sông Đồng Nai - Sài Gòn, rạch Bến Nghé và Tàu Hủ chi phối cư trú và giao thương. Năm 1698, Chúa Nguyễn Phúc Chu sai Nguyễn Hữu Cảnh lập phủ Gia Định, đặt dinh Trấn Biên tại Biên Hòa và Phiên Trấn tại Sài Gòn [1, 2]. Đất xây dựng chỉ chiếm 3% diện tích tự nhiên, phân

bố theo cấu trúc thành - thị - làng. Bến Nghé - Sài Gòn giữ chức năng hành chính - quân sự, Chợ Lớn phát triển thương mại, Lái Thiêu - Phú Cường hình thành làng nghề, Bà Rịa - Vũng Tàu gắn với trung chuyển và đánh cá. Thành Bát Quái năm 1790, bản đồ Trần Văn Học năm 1815 và thành Phụng năm 1836 cho thấy hạt nhân hành chính thay đổi nhưng mạng cư trú - thương mại ven sông tiếp tục mở rộng [3].



Hình 3: Bản đồ Gia Định năm 1815 do Trần Văn Học vẽ. *Nguồn: Wikipedia*

Giai đoạn 1859 - 1945: Quy hoạch do Coffyn lập năm 1862 tổ chức mạng đường ô bàn cờ trên diện tích 2.500 ha. Đất giao thông chiếm 18 - 20% đất xây dựng, cây xanh đạt 10 - 12 m^2/người. Sài Gòn giữ chức năng hành chính - tài chính, Chợ Lớn đảm nhận thương mại - kho vận. Thủ Dầu Một phục vụ vùng cao su, Vũng Tàu (Cap Saint-Jacques) phát triển nghỉ dưỡng và quân cảng. Dân số tăng từ khoảng 50.000 người năm 1862 lên gần 500.000 người năm 1940. Định hướng quy hoạch của Ernest Hébrard năm 1923 không được thực hiện đầy đủ. Sắc lệnh ngày 27/4/1931 thành lập Khu Sài Gòn - Chợ Lớn hợp nhất hai vùng thành một [20]; Đồ án của Henri Cerutti năm 1943 tiếp tục định hướng hợp nhất hai cực nhưng chưa thành hiện thực bởi chiến tranh.



Hình 4. Bản đồ quy hoạch Sài Gòn của Coffyn lập năm 1862. *Nguồn: Trung tâm Lưu trữ Quốc gia II*

Giai đoạn 1945 - 1975: Di dân thời chiến làm hạ tầng ngoại vi quá tải. Thủ Dầu Một, Bà Rịa và Vũng Tàu phát triển dọc Quốc lộ 13 và Quốc lộ 15; khoảng trống Sài Gòn - Chợ Lớn được lấp bằng khu chia lô, cư xá và nhà ở tự phát. Năm 1969, Đô thành Sài Gòn có 67,53 km^2 đất xây dựng, gần 2 triệu người, mật độ 29.616 người/km^2. Xa lộ Biên Hòa và Khu công nghiệp Biên Hòa năm 1963 thúc đẩy sự phát triển ở hướng Đông. Giao thông chuyển sang đường bộ hướng tâm, trong khi cây xanh và mặt nước suy giảm. Quy hoạch tổng thể thiếu nguồn lực thực hiện nên cấu trúc hình thành trên thực tế không theo ý đồ quy hoạch.

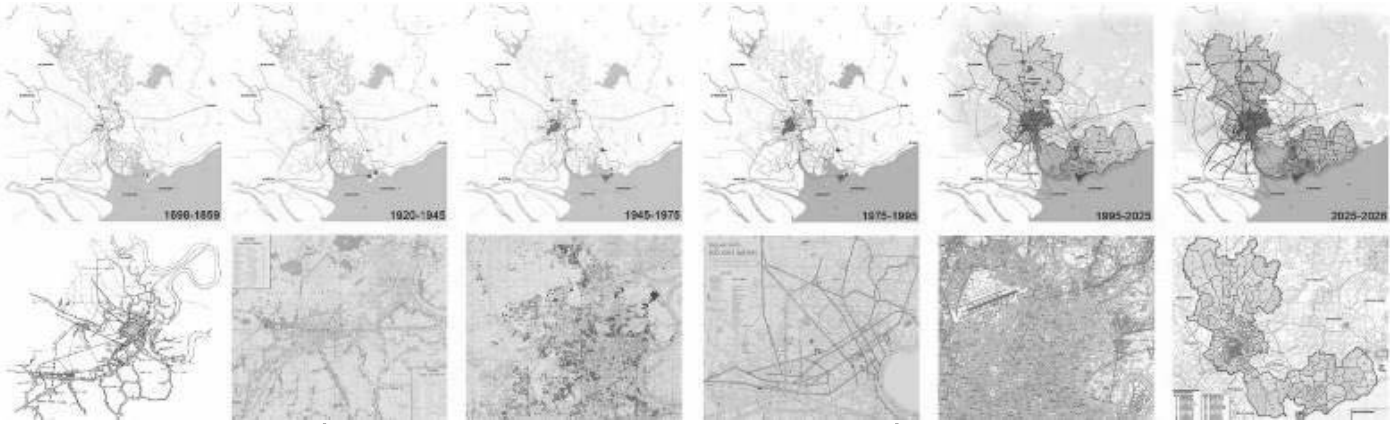
Hình 5. Bản đồ đô thành Sài Gòn 1966. *Nguồn: Trung tâm Lưu trữ Quốc gia II*

Giai đoạn 1975 - 1995: Ngày 02/7/1976, Quốc hội khóa VI quyết định thành phố Sài Gòn - Gia Định mang tên TP.HCM [21]. Nội thành tăng mật độ bằng xây chen, cơi nới. Kênh rạch và không gian công cộng bị thu hẹp. Dân cư, việc làm và dịch vụ tiếp tục tập trung tại lõi. Liên kết với Thủ Dầu Một và Bà Rịa - Vũng Tàu thiếu đầu tư. Quy hoạch tổng thể đến năm 2010, phê duyệt tại Quyết định số 20/TTg ngày 16/01/1993, lựa chọn mô hình đơn tâm mở rộng về phía Đông - Đông Bắc và phía Nam [4].

Giai đoạn 1995 - 2025: Các quy hoạch chung TP.HCM năm 1993, 1998 và 2010 cho thấy sự phát triển về phía Đông và Nam với Thủ Đức - Xa lộ Hà Nội, Tân Thuận - Nguyễn Văn Linh - Phú Mỹ Hưng. Điều chỉnh quy hoạch năm 1998 xác lập Nam Thành phố - Hiệp Phước và Thủ Thiêm [5]; Điều chỉnh quy hoạch năm 2010 tổ chức mô hình tập trung - đa cực theo bốn hướng [6]. Thực tế, cực Đông phát triển nhanh, còn Tây Bắc, Hiệp Phước và metro chậm hơn dự kiến. Chuỗi công nghiệp - đô thị Bình Dương hình thành phía Bắc. Phú Mỹ - Cái Mép - Thị Vải trở thành cực cảng, logistics phía Đông Nam. Dân số ba khu vực tăng từ 9,64 triệu người năm 2009 lên 12,57 triệu năm 2019. Cấu trúc đa cực hình thành nhưng việc làm và giao thông vẫn phụ thuộc lớn vào lõi trung tâm.

Hình 6. Phối cảnh đô thị mới Phú Mỹ Hưng. *Nguồn: SOM*

Giai đoạn 2025 - 2026: Bộc lộ độ lệch giữa quy hoạch và địa giới. Quyết định phê duyệt quy hoạch số 1125/QĐ-TTg ngày 11/6/2025 tổ chức TP.HCM cũ theo sáu phân vùng, định hướng 12 tuyến đường sắt đô thị dài khoảng 582 km và bảo vệ khung xanh - nước [8]. Từ ngày 01/7/2025, Nghị quyết số 202/2025/QH15 hợp nhất TP.HCM, Bình Dương và Bà Rịa - Vũng Tàu. Cấu trúc mới gồm vùng trung tâm tài chính - dịch vụ và đổi mới sáng tạo, vùng công nghiệp - đô thị phía Bắc, vùng cảng biển - logistics - du lịch phía Đông Nam và đặc khu Côn Đảo. Tuy nhiên, Quy hoạch chung TP.HCM cũ, Quy hoạch tỉnh Bình Dương và Quy hoạch tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu chưa hợp thành một quy hoạch chung [8, 22, 23].



Hình 7. Quá trình hình thành và biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM qua sáu giai đoạn. *Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp*

3.2. Nhận diện sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM

Chồng lớp bản đồ, đối chiếu quy hoạch và so sánh ba khu vực theo bảy tiêu chí cho thấy cấu trúc TP.HCM đã chuyển từ các điểm cư trú - giao thương theo sông rạch sang hệ thống đô thị - công nghiệp - cảng biển đa cực. Tuy nhiên, các thành phần biến đổi không đồng đều và chưa tạo thành một chỉnh thể tích hợp.

a) Vị trí địa lý và nền tảng tự nhiên - sinh thái

Không gian chuyển tiếp từ thềm phù sa cổ Bình Dương, qua bình nguyên thấp Sài Gòn đến vùng cửa sông - ven biển Cần Giờ và Bà Rịa - Vũng Tàu. Khoảng 55% diện tích TP.HCM cũ có cao độ 0 - 2 m, nhưng xây dựng vẫn mở rộng về Nam và Đông Nam, gia tăng xung đột với không gian trữ và thoát nước.

b) Sử dụng đất và mức độ đô thị hóa

Đất xây dựng mở rộng từ lõi Sài Gòn - Chợ Lớn theo các hành lang Thủ Đức - Dĩ An - Thuận An, Nam Sài Gòn - Hiệp Phước và Phú Mỹ - Bà Rịa - Vũng Tàu. Các khu công nghiệp và cảng tạo vùng đô thị hóa mới, nhưng phát triển tuyến tính, xen cài đất nông nghiệp, vùng trũng và sông rạch cho thấy chuyển đổi đất nhanh hơn cung ứng hạ tầng.

c) Hệ thống trung tâm và khu vực chức năng

Cấu trúc lưỡng cực chuyển thành đơn tâm mở rộng, sau đó xuất hiện các cực Thủ Thiêm - Thủ Đức, Thủ Dầu Một - Thành phố mới Bình Dương và Phú Mỹ - Bà Rịa - Vũng Tàu. Các cực đã hình thành về không gian và chức năng nhưng cấp bậc, phạm vi phục vụ và liên kết chưa hoàn chỉnh; chức năng quản trị, tài chính và dịch vụ chất lượng cao vẫn tập trung tại lõi.

d) Phân bố dân cư, kinh tế và việc làm

Dân số ba khu vực tăng từ khoảng 9,64 triệu người năm 2009 lên 12,57 triệu năm 2019 và hơn 14 triệu năm 2025 [7]. Dân cư, nhà ở dịch chuyển nhanh ra ngoại vi nhưng việc làm và dịch vụ cấp vùng chưa phân bố tương ứng, làm tăng đi lại hướng tâm và thiếu hụt hạ tầng xã hội tại các khu vực đô thị hóa nhanh.

e) Mạng lưới giao thông và khả năng tiếp cận

Giao thông chuyển từ sông rạch - bến cảng sang đường bộ hướng tâm, cao tốc và vành đai. Đất giao thông chiếm 12,8% đất xây dựng; giao thông tĩnh đáp ứng 7 - 10% nhu cầu; vận tải công cộng đảm nhận khoảng 7% số chuyến đi và đường sắt đô thị mới khai thác 1,9% chiều dài định hướng [9]. Mạng đường thủy dài khoảng 1.433,85 km chưa kết nối đồng bộ với đường sắt và các trung tâm logistics.

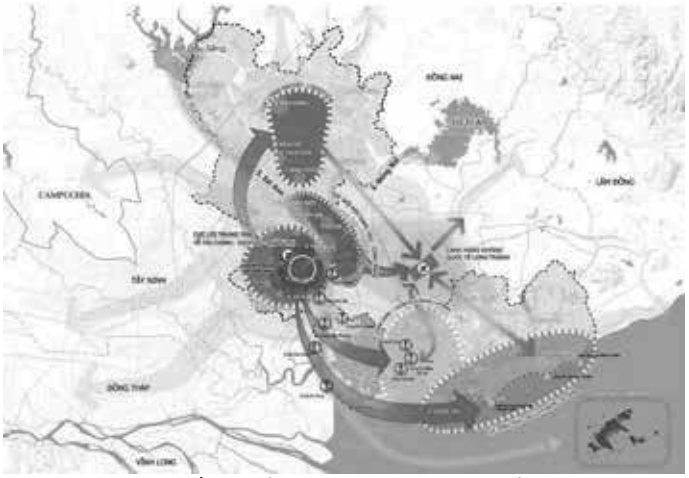
f) Không gian mở và cấu trúc lịch sử - văn hóa

Các lõi Sài Gòn - Chợ Lớn - Gia Định, làng nghề Bình Dương và đô thị cảng - biển Bà Rịa - Vũng Tàu vẫn lưu giữ cấu trúc đặc trưng. Tuy nhiên, kênh rạch, hành lang ven sông, vườn cây và khoảng mở bị thu hẹp hoặc chia cắt; các di sản chủ yếu được bảo tồn như những điểm riêng lẻ, chưa kết nối thành mạng lưới xanh - nước và không gian lịch sử liên tục.

g) Quy hoạch, pháp luật, quản lý và mức độ thực hiện

Quy hoạch chuyển từ đơn tâm mở rộng sang đa hướng và tập trung - đa cực, nhưng trung tâm, đường sắt đô thị, vành đai và hành lang xanh triển khai chậm hơn chuyển đổi đất. Sau sáp nhập, ba hệ thống quy hoạch cũ chưa hợp nhất thành một quy hoạch chung.

Tổng hợp bảy tiêu chí cho thấy TP.HCM đã chuyển sang cấu trúc đa cực - đa hành lang nhưng mức độ tích hợp còn hạn chế. Sử dụng đất, dân cư và các hành lang kinh tế biến đổi nhanh hơn giao thông công cộng, không gian mở và cơ chế điều phối, tạo nên mất cân bằng cấu trúc.



Hình 8. TP.HCM chuyển sang cấu trúc đa cực - đa hành lang. *Nguồn: VIUP*

3.3. Động lực và quy luật biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM

Sự biến đổi chịu tác động của năm nhóm động lực:

(1) Điều kiện địa lý và sông - biển;

(2) Gia tăng dân số, di cư và chuyển dịch kinh tế;

(3) Đầu tư giao thông, cảng và khu công nghiệp;

(4) Thị trường đất đai - bất động sản;

(5) Quy hoạch, địa giới và năng lực quản lý.

Các động lực này vừa tạo các cực và hành lang mới, vừa thúc đẩy phát triển phân tán khi hạ tầng và kiểm soát đất đai không theo kịp.

Nghiên cứu xác định sáu quy luật:

(1) Cấu trúc mới kế thừa và chồng lớp cấu trúc tự nhiên - lịch sử;

(2) Đô thị mở rộng theo hành lang giao thông và đầu mối kinh tế;

(3) Cấu trúc chuyển từ lưỡng cực, đơn tâm mở rộng sang đa cực nhưng lõi lịch sử vẫn chi phối;

(4) Dân cư phân bố lại nhanh hơn việc làm và dịch vụ;

(5) Thực tế thường đi trước hoặc lệch khỏi quy hoạch do khác biệt về nguồn lực, tiến độ hạ tầng và quản lý;

(6) Hợp nhất địa giới thúc đẩy chuyển từ các cấu trúc riêng lẻ sang cấu trúc vùng tích hợp. Quy luật bao trùm là đa cực hóa diễn ra nhanh hơn khả năng kết nối, cân bằng chức năng và điều phối không gian.

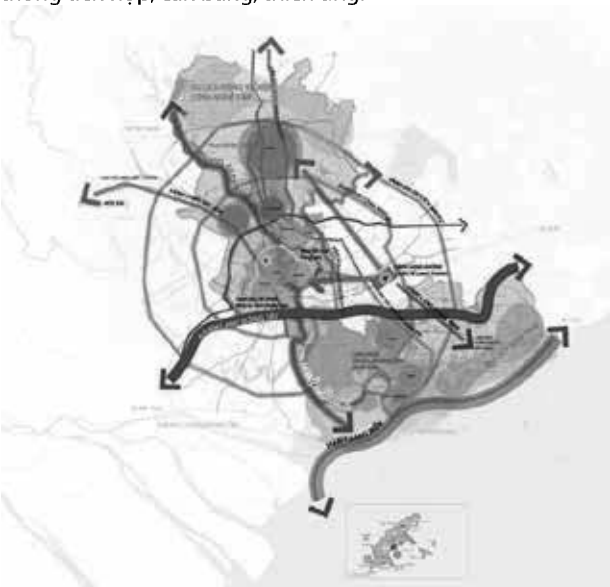
3.4. Định hướng kiểm soát sự biến đổi cấu trúc không gian đô thị TP.HCM

Sau sáp nhập, TP.HCM có xu hướng chuyển từ đa cực trong từng địa phương sang hệ thống đa cực toàn đô thị: lõi Sài Gòn, Chợ Lớn, Thủ Thiêm, Thủ Đức giữ vai trò quản trị, tài chính, dịch vụ cao cấp và đổi mới sáng tạo. Chuỗi Dĩ An, Thuận An, Thủ Dầu Một, Bến Cát phát triển công nghiệp - đô thị. Hành lang Phú Mỹ, Bà Rịa - Vũng Tàu đảm nhận cảng biển, logistics, năng lượng và du lịch. Vành đai, cao tốc và đường sắt sẽ mở rộng ảnh hưởng của các trung tâm, nhưng có thể kéo dài đô thị hóa phân tán nếu thiếu kiểm soát.

Nghiên cứu đề xuất phát triển đa trung tâm có kiểm soát, xác định rõ chức năng, quy mô dân số, phạm vi phục vụ và quan hệ giao thông công cộng của từng cực. Phát triển mới cần tập trung quanh đầu mối đường sắt đô thị, đường sắt vùng và trạm trung chuyển theo TOD; hạn chế xây dựng dàn trải dọc đường bộ, trên vùng trũng, hành lang thoát nước và khu vực sinh thái nhạy cảm.

Quy hoạch chung mới phải bao quát toàn bộ địa giới, tích hợp sử dụng đất, dân cư, việc làm, giao thông, hạ tầng kỹ thuật và mạng lưới xanh - nước. Đồng thời bảo tồn lõi Sài Gòn - Chợ Lớn - Gia Định và kết nối sông Sài Gòn - Đồng Nai, kênh rạch, rừng ngập mặn Cần Giờ, không gian ven biển thành khung tự nhiên liên tục.

Thực hiện quy hoạch cần được giám sát bằng chỉ tiêu định lượng về chuyển đổi đất, mật độ dân số, việc làm, tiếp cận giao thông công cộng, không gian mở và tiến độ hạ tầng. Đây là điều kiện thu hẹp độ lệch giữa quy hoạch với thực tế và chuyển cấu trúc đa cực thành hệ thống tích hợp, cân bằng, thích ứng.



Hình 9. Định hướng cấu trúc không gian đô thị TP.HCM trong bối cảnh mới

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu nhận diện quá trình biến đổi cấu trúc không gian của TP.HCM từ cấu trúc cư trú - giao thương theo sông rạch, qua lưỡng cực Sài Gòn - Chợ Lớn và đơn tâm mở rộng, đến đa cực - đa hành lang sau hợp nhất. Cấu trúc hiện nay là kết quả chồng lớp giữa nền tảng tự nhiên, lịch sử, quy hoạch, hạ tầng, phân bố dân cư - việc làm và cơ chế quản lý.

Khung bảy tiêu chí cho thấy biến đổi mạnh nhất diễn ra ở sử dụng đất, dân cư và các hành lang đô thị - công nghiệp - cảng biển. Trong khi giao thông công cộng, không gian mở, phân bố việc làm và điều phối phát triển chuyển đổi chậm hơn. Sự không đồng đều tạo độ lệch giữa quy hoạch với thực tế, nơi ở với nơi làm việc, mở rộng xây dựng với năng lực hạ tầng và giới hạn tự nhiên.

Sáu quy luật được xác định gồm kế thừa và chồng lớp lịch sử; mở rộng theo hành lang; chuyển từ đơn tâm sang đa cực; tái phân bố không đồng đều dân cư - chức năng - việc làm; lệch pha giữa quy hoạch với thực hiện; tích hợp không gian vùng. Trong đó, đa cực hóa diễn ra nhanh hơn khả năng kết nối, cân bằng chức năng và quản trị không gian.

Vì vậy, TP.HCM cần phát triển đa trung tâm có kiểm soát, gắn dân cư - việc làm với giao thông công cộng, bảo vệ mạng lưới xanh - nước và cấu trúc lịch sử. Quy hoạch chung toàn địa giới, cơ chế điều phối thống nhất và hệ chỉ tiêu giám sát là điều kiện chuyển cấu trúc đa cực hiện hữu thành hệ thống đô thị tích hợp và thích ứng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Trịnh Hoài Đức. Gia Định thành thông chí (Lý Việt Dũng dịch và chú giải). NXB. Tổng hợp Đồng Nai, 2006.

[2] Nguyễn Đình Đầu. Nghiên cứu địa bạ triều Nguyễn: Gia Định. NXB. TP Hồ Chí Minh, 1998.

[3] Sơn Nam. Bến Nghé xưa. NXB. Trẻ, 2014.

[4] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 20/TTg phê duyệt Quy hoạch tổng thể xây dựng TP Hồ Chí Minh đến năm 2010, 1993.

[5] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 123/1998/QĐ-TTg phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch chung TP Hồ Chí Minh đến năm 2020, 1998.

[6] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 24/QĐ-TTg phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch chung xây dựng TP Hồ Chí Minh đến năm 2025, 2010.

[7] Quốc hội. Nghị quyết số 202/2025/QH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh, 2025.

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1125/QĐ-TTg phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch chung TP Hồ Chí Minh đến năm 2040, tầm nhìn đến năm 2060, 2025.

[9] Sở Quy hoạch - Kiến trúc TP Hồ Chí Minh. Điều chỉnh Quy hoạch chung TP Hồ Chí Minh đến năm 2040, tầm nhìn đến năm 2060: Tập 2, Báo cáo hạ tầng kỹ thuật và môi trường, 2023.

[10] Bertaud, A. Order without design: How markets shape cities. MIT Press, 2018.

[11] OECD. Redefining "urban": A new way to measure metropolitan areas. OECD Publishing, 2012, doi: 10.1787/9789264174108-en.

[12] UN-Habitat. International guidelines on urban and territorial planning. United Nations Human Settlements Programme, 2015.

[13] Christaller, W. Central places in Southern Germany (C. W. Baskin, Trans.). Prentice-Hall, 1966. (Original work published 1933).

[14] Batten, D. F. Network cities: Creative urban agglomerations for the 21st century. Urban Studies, vol. 32, no. 2, pp. 313-327, 1995, doi: 10.1080/00420989550013103.

[15] Healey, P. Urban complexity and spatial strategies: Towards a relational planning for our times. Routledge, 2007.

[16] Alexander, E. R., Faludi, A. Planning and plan implementation: Notes on evaluation criteria. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 16, no. 2, pp. 127-140, 1989, doi: 10.1068/b160127

[17] Conzen, M. R. G, Alnwick. Northumberland: A study in town-plan analysis. Institute of British Geographers, 1960.

[18] Moudon, A. V. Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. Urban Morphology, vol. 1, no. 1, pp. 3-10. 1997.

[19] Cervero, R., Kockelman, K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity and design. Transportation Research Part D, vol. 2, no. 3, pp. 199-219, 1997, doi: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6.

[20] Président de la République française. Décret portant création de la Région de Saïgon-Cholon. Journal officiel de la République française, 27 avril 1931.

[21] Quốc hội. Nghị quyết về việc chính thức đặt tên thành phố Sài Gòn - Gia Định là TP Hồ Chí Minh, 1976.

[22] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 790/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch tỉnh Bình Dương thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2024.

[23] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1629/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2023.

■Ngày nhận bài: 06/8/2026 ■Ngày sửa bài: 17/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/8/2026

Khung tổ chức thực hiện quản trị rủi ro ngập úng trong phát triển đô thị thông minh tại Việt Nam

An implementation framework for urban flood risk governance in smart City development in Vietnam

> ĐỖ MINH PHÚC
Cục Phát triển đô thị (Bộ Xây dựng)
Email: phucdo0201@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất khung tổ chức thực hiện quản trị rủi ro ngập úng trong phát triển đô thị thông minh tại Việt Nam, trên cơ sở tổng quan có chủ đích và đối chiếu 20 tài liệu. Kết quả nghiên cứu nhận diện các yêu cầu quản lý trong văn bản quy phạm pháp luật và các nhiệm vụ liên quan trong đề án, kế hoạch của sáu địa phương; đồng thời xác định các nội dung có thể kế thừa về dữ liệu, mô hình, phối hợp và thích ứng, cùng với giới hạn áp dụng của các nghiên cứu. Khung được xây dựng trên cơ sở liên kết sáu nhóm nội dung với hồ sơ thực hiện nhiệm vụ và ba lớp đánh giá, tập trung cụ thể hóa nhiệm vụ cảnh báo và ứng phó. Đóng góp của nghiên cứu tập trung vào cách thức liên kết có thể kiểm chứng giữa dữ liệu đầu vào, trách nhiệm xác nhận, điều kiện ra quyết định, chuyển giao thông tin và hồ sơ thực hiện, phục vụ quản lý nhà nước. Tình huống cảnh báo ngập gần trường học minh họa cách sử dụng khung. Bài báo chưa sử dụng dữ liệu vận hành để kiểm chứng khung đề xuất. Nghiên cứu tiếp theo định hướng áp dụng thử nghiệm chuỗi cảnh báo–hành động tại một hoặc một số đô thị được lựa chọn.

Từ khóa: Đô thị thông minh; quản trị rủi ro ngập úng; quản lý nhà nước; tổ chức thực hiện.

ABSTRACT

This paper proposes an implementation framework for urban flood risk governance in smart city development in Viet Nam, based on a purposive review and comparative analysis of 20 documents. The findings identify governance requirements in national legislation and related tasks in the schemes and plans of six localities, together with findings on data, modelling, coordination and adaptation from previous studies and the limits of their applicability. The framework links six groups of task-specific content to implementation records and three assessment layers, focusing on warning and response tasks. The contribution centres on verifiable links between input data, responsibilities for verification, decision-making conditions, information handovers and implementation records to support public administration. A scenario involving flood warnings near a school illustrates how the framework can be used. Operational data have not been used to validate the proposed framework. Further research will focus on testing a warning-to-action process in one or more selected cities.

Keywords: Smart city; urban flood risk governance; public administration; implementation framework.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghị định số 269/2025/NĐ-CP và Thông tư số 03/2026/TT-BXD yêu cầu phát triển đô thị thông minh gắn với dữ liệu, điều hành và đánh giá cấp độ trưởng thành [1, 2]. Quản trị rủi ro ngập úng là lĩnh vực phù hợp để cụ thể hóa phương thức quản lý này. Theo Báo cáo số 313/BC-BXD, đến năm 2024, các đô thị có khoảng 397 điểm ngập úng, tổng diện tích khoảng 924 ha [3]. Số liệu minh họa quy mô vấn đề, cho thấy ngập úng tiếp tục đặt ra thách thức đối với phát triển đô thị tại Việt Nam.

Quản trị ngập úng là vấn đề liên ngành, gắn với quy hoạch đô thị, tổ chức không gian trữ nước, đầu tư và vận hành hệ thống hạ tầng. Nghiên cứu về Hà Nội nhấn mạnh phục hồi sông, hồ và quản lý theo lưu vực [4]. Các đề án, kế hoạch phát triển đô thị thông minh của TP.HCM, Hà Nội, Cần Thơ, Đà Nẵng, Huế và Hải Phòng đã đưa ra yêu cầu về dữ liệu, giám sát thoát nước hoặc cảnh báo ngập úng [5 - 11]. Vấn đề đặt ra là tổ chức các nhiệm vụ đó thành một quá trình ra quyết định và thực hiện có trách nhiệm rõ ràng.

Bài báo hướng đến ba kết quả: Thứ nhất, đối chiếu yêu cầu trong văn bản quy phạm pháp luật với nhiệm vụ trong các đề án, kế hoạch địa phương; thứ hai, xác định nội dung kế thừa và giới hạn áp dụng của các nghiên cứu đã công bố; thứ ba, đề xuất khung tổ chức thực hiện phục vụ quản lý nhà nước. Trọng tâm là cụ thể hóa các yêu cầu quản trị thành những nhiệm vụ được phân công rõ trách nhiệm, có kết quả và căn cứ kiểm tra rõ ràng, làm cơ sở cho nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo.

2. CÁCH TIẾP CẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong bài báo này, quản trị rủi ro ngập úng được hiểu là quá trình xác lập mục tiêu, thẩm quyền, trách nhiệm và quy tắc phối hợp giữa các chủ thể trong việc sử dụng thông tin, ra quyết định, tổ chức thực hiện và giám sát các hoạt động phòng ngừa, ứng phó và phục hồi sau ngập úng nhằm giảm thiểu rủi ro và hậu quả do ngập úng. Đô thị thông minh cung cấp thông tin và công cụ hỗ trợ cho quản trị rủi ro ngập úng; tuy nhiên, hiệu quả quản trị còn phụ thuộc vào hạ tầng, thẩm quyền và nguồn lực. Bài báo tập trung cụ thể hóa nhiệm vụ theo chuỗi cảnh báo - hành động; các nhiệm vụ phòng ngừa dài hạn và phục hồi cần được tiếp tục nghiên cứu.

Nghiên cứu sử dụng tổng quan có chủ đích và đối chiếu 20 tài liệu, cập nhật đến ngày 18/09/2026. Các đề án, kế hoạch của sáu thành phố được tác giả tiếp cận từ hồ sơ do các địa phương gửi báo cáo về Cục Phát triển đô thị, Bộ Xây dựng, nơi tác giả công tác. Các tài liệu khác được thu thập trực tiếp từ cơ quan phát hành, công bố hoặc từ website của cơ quan đó. Bộ tài liệu bằng tiếng Việt và tiếng Anh tập trung vào nhiệm vụ quản trị, điều kiện triển khai và đánh giá. Các nghiên cứu được lựa chọn theo mức độ liên quan đến tổ chức thực hiện, dữ liệu và công cụ hỗ trợ ra quyết định hoặc đánh giá trong quản trị rủi ro ngập úng. Phạm vi đối chiếu địa phương được xác định theo bộ hồ sơ đã tiếp cận được, không được xem là mẫu đại diện cho tất cả các đô thị Việt Nam. Đối với Huế, cả Đề án và Kế hoạch số 334/KH-UBND đều được sử dụng vì hai văn bản này bổ trợ nhau về định hướng và nhiệm vụ triển khai; với năm địa phương còn lại, chỉ Đề án được sử dụng vì cung cấp nội dung đầy đủ hơn cho việc đối chiếu. Đây không phải tổng quan hệ thống; bộ tài liệu có thể chưa bao quát hết các nghiên cứu có liên quan.

Bài báo phân tích, đối chiếu và hệ thống hóa các yêu cầu, nhiệm vụ quản trị rủi ro ngập úng trong văn bản quản lý, kết hợp với kết quả, đề xuất của các nghiên cứu đã công bố theo sáu nhóm: nhiệm vụ và trách nhiệm; dữ liệu và chia sẻ thông tin; phân tích và kịch bản; quyết định và hành động; nguồn lực và sự tham gia; đánh giá và cập nhật. Sáu nhóm nội dung này được xác định ban đầu để định hướng việc đối chiếu tài liệu; nội dung cụ thể của từng nhóm được làm rõ dần qua quá trình tổng hợp. Với mỗi nhóm, bài báo chỉ rõ căn cứ, nội dung kế thừa và phần cụ thể hóa thành hồ sơ nhiệm vụ tại Bảng 3. Việc hệ thống hóa chưa chứng minh tính đầy đủ hoặc hiệu quả của khung đề xuất. Khi phân tích, bài báo phân biệt yêu cầu pháp lý, nhiệm vụ dự kiến, hoạt động được tài liệu báo cáo và kết quả đã được kiểm chứng; tính chính thống của nguồn không thay thế bằng chứng về hiệu quả. Nghiên cứu không bao gồm khảo sát thực địa, so sánh hiệu quả quản trị ngập úng giữa các địa phương hoặc ước lượng tác động nhân quả.

3. KẾT QUẢ ĐỐI CHIẾU YÊU CẦU TRONG VĂN BẢN QUY PHẠM PHÁP LUẬT VỚI NHIỆM VỤ TRONG CÁC ĐỀ ÁN, KẾ HOẠCH CỦA ĐỊA PHƯƠNG

3.1. Từ yêu cầu pháp lý đến nhiệm vụ quản trị

Khoản 4 Điều 33 Nghị định số 269/2025/NĐ-CP yêu cầu kịch bản điều hành liên ngành xác định ngưỡng dữ liệu kích hoạt, phối hợp, trách nhiệm và hành động ứng phó [1]. Chỉ số III.TNM.09.01 của Thông tư số 03/2026/TT-BXD gắn thoát nước bền vững với giám sát, cảnh báo ngập úng, chia sẻ thông tin và công nghệ hỗ trợ kiểm soát rủi ro [2]. Từ các yêu cầu trên, bài báo đề xuất gắn hành động ứng phó với hồ sơ và dữ liệu thực hiện để phục vụ kiểm tra, đánh giá.

Việc đối chiếu hai văn bản cho thấy ba thành phần cần được liên kết, gồm: nhiệm vụ bảo vệ đô thị; dữ liệu và phân tích phục vụ ra quyết định; trách nhiệm thực hiện và đánh giá. Kết quả đối chiếu được sử dụng làm cơ sở so sánh với các đề án, kế hoạch của địa phương tại mục 3.2 và 3.3, không nhằm thiết lập thêm các tiêu chí pháp lý.

3.2. Các hình thức cụ thể hóa tại sáu địa phương

Bảy văn bản đề án, kế hoạch của sáu địa phương đề cập đến các nhiệm vụ quản trị ngập úng với mức độ chi tiết khác nhau, phản ánh mục tiêu và thời kỳ áp dụng của từng văn bản (Bảng 1). Các tài liệu này chưa đủ cơ sở để đánh giá hiệu quả quản trị của từng địa phương.

Bảng 1. Nhiệm vụ liên quan đến ngập úng trong các đề án, kế hoạch của sáu địa phương

Địa phương	Nội dung được giao	Đầu mối và thời kỳ áp dụng
TP.HCM [5]	Giám sát thoát nước mưa, cảnh báo; AI đánh giá rủi ro và tối ưu vận hành.	Sở Xây dựng; tích hợp dữ liệu trọng điểm năm 2027, vận hành toàn thành phố năm 2030.
Hà Nội [6]	Hệ thống hỗ trợ kiểm soát ngập: cảnh báo, điều phối bơm/cống, cứu hộ; dữ liệu mưa, mực nước, trạng thái công trình và phản ánh người dân.	Sở Xây dựng chủ trì; Công an Thành phố phối hợp. Lộ trình theo quý từ xác định kịch bản đến cảnh báo đa kênh và đánh giá theo trận mưa.
Cần Thơ [7]	Mở rộng FRMIS; tích hợp dữ liệu mưa, triều, mực nước nội đồng; hỗ trợ quyết định vận hành cống, bơm và theo dõi chỉ số ngập.	Sở NN&MT chủ trì nhiệm vụ mở rộng FRMIS, giai đoạn 2026 - 2027.
Đà Nẵng [8]	Cấp, thoát nước thông minh; IoT dùng chung thu thập dữ liệu ngập; bản sao số môi trường phục vụ mô phỏng, dự báo và cảnh báo tại IOC.	Sở Xây dựng: cấp, thoát nước và nội dung đô thị thông minh; Sở KH&CN: chuyển đổi số, IoT dùng chung; Sở NN&MT: bản sao số môi trường. Giai đoạn 2026 - 2030, định hướng 2035.
Huế [9]; [10]	Đề án xác định nền tảng và nhiệm vụ cảnh báo thiên tai; Kế hoạch số 334/KH-UBND cụ thể hóa thử nghiệm mô phỏng, cảnh báo ngập và kịch bản hỗ trợ quyết định qua IOC, Hue-S.	Sở KH&CN chủ trì nhiệm vụ thử nghiệm theo Kế hoạch số 334/KH-UBND; thời hạn quý III/2026.
Hải Phòng [11]	Bản sao số mô phỏng ngập, triều cường ở khu vực thấp trũng, hỗ trợ điều hành tiêu thoát nước và trạm bơm; IoT dùng chung.	Đề án yêu cầu xây dựng phương án chi tiết; phần nội dung được khai thác chưa nêu đầu mối và mốc riêng cho nhiệm vụ ngập.

Nguồn: Tổng hợp từ [5 - 11]. Bảng thể hiện nhiệm vụ và mốc dự kiến, không phải kết quả đã hoàn thành. AI: trí tuệ nhân tạo; IoT: Internet vạn vật; IOC: trung tâm giám sát, điều hành thông minh; FRMIS: hệ thống thông tin quản lý rủi ro ngập; KH&CN: Khoa học và Công nghệ; NN&MT: Nông nghiệp và Môi trường.

Trong một địa phương, các nhiệm vụ có thể bao gồm nền tảng dùng chung, nhiệm vụ chuyên ngành và các hoạt động thí điểm có thời hạn, do đó cần bảo đảm liên kết dữ liệu và phân công trách nhiệm rõ ràng giữa các nhiệm vụ.

Đề án Đà Nẵng báo cáo các hoạt động kết nối dữ liệu mưa, mực nước, cảnh báo lũ với IOC; cung cấp thông tin qua Danang SmartCity; xây dựng bản đồ số ngập úng và phần mềm theo dõi sơ tán dân [8]. Tuy nhiên, thông tin này chưa đủ cơ sở để đánh giá độc lập độ chính xác, tính liên tục của hệ thống hoặc hiệu quả giảm thiệt hại.

3.3. Yêu cầu về tổ chức thực hiện rút ra từ kết quả đối chiếu

Đối chiếu yêu cầu tại mục 3.1 với Bảng 1 cho thấy ba mối liên hệ. Về dữ liệu phục vụ ra quyết định, Hà Nội nêu mưa, mực nước, trạng thái bơm/cống và phản ánh người dân [6]; Cần Thơ nêu mưa, triều và nước nội đồng [7]; danh mục này giúp xác định đầu vào, chưa cho biết chất lượng dữ liệu và ngưỡng kích hoạt trong từng sự kiện. Về phối hợp, Hà Nội có phân công chủ trì và phối hợp; Cần Thơ giao đầu mối FRMIS [7]. Về hành động, Hà Nội điều phối bơm/cống, cứu hộ; Huế có nhiệm vụ thử nghiệm [9]; Hải Phòng định hướng mô phỏng hỗ trợ tiêu thoát nước [11].

Những nội dung trên cho thấy cần làm rõ trách nhiệm xác nhận thông tin, ra quyết định và phản hồi trong từng nhiệm vụ. Yêu cầu này cần được xem xét cùng các vấn đề về hạ tầng, vận hành và phối hợp nêu trong Báo cáo số 313/BC-BXD [3].

Ở khía cạnh khác, đề án Đà Nẵng đã nhận diện hạn chế về chất lượng, cập nhật dữ liệu ngành, hạ tầng công nghệ thông tin và nhân lực [8], nhưng đây là đánh giá chung về chuyển đổi số, không phải kết luận riêng về quản trị ngập úng.

Kết quả đối chiếu xác định cần có sự liên kết dữ liệu, chủ thể, quyết định và hành động trong hồ sơ từng nhiệm vụ. Việc chưa có đủ hồ sơ vận hành trong bộ tài liệu được phân tích không đủ cơ sở kết luận địa phương thiếu quy trình, chưa phối hợp hoặc không đáp ứng yêu cầu pháp lý.

4. KẾT QUẢ TỔNG HỢP MỘT SỐ NGHIÊN CỨU ĐÃ CÔNG BỐ

Từ yêu cầu tại mục 3, bài báo tổng hợp các nghiên cứu đã công bố, từ đó làm rõ nội dung kế thừa, giới hạn áp dụng và hướng phát triển khung tổ chức thực hiện.

Nghiên cứu của Hung V. Ngo và Hau Do tại Lào Cai đề xuất tám chiều quản trị, ghi nhận hạn chế về trách nhiệm giải trình, minh bạch, tích hợp dịch vụ cùng nhu cầu đào tạo [12]. Bài báo kế thừa các khía cạnh đánh giá tổ chức, không suy ra mức giảm ngập. Nghiên cứu tại Thủ Đức đề xuất khung Intelligent Urban Watershed với chu trình điều khiển và vai trò phê duyệt của con người, đồng thời đề xuất thí điểm, nghiên cứu phối hợp liên ngành và phân tích chi phí - lợi ích [13]. Giá trị kế thừa là liên kết dữ liệu, quyết định và phản hồi; khả năng áp dụng vẫn cần kiểm chứng theo bối cảnh.

Altındaş và cộng sự phân tích sâu 48 nghiên cứu, cho thấy nhiều ứng dụng bản sao số còn ở mức ý tưởng hoặc nguyên mẫu, hạn chế về liên thông dữ liệu và quản trị [14]. Hlal và cộng sự làm rõ khả năng tích hợp quan trắc, mô hình và cảnh báo sớm [15]. Bhanye nhấn mạnh trách nhiệm, sự tham gia và công bằng trong thích ứng ngập úng dựa trên AI [16]. Các nghiên cứu cung cấp cơ sở lựa chọn công cụ và xác định điều kiện về chất lượng, chia sẻ dữ liệu, trách nhiệm sử dụng kết quả và sự tham gia của các bên.

Bảng 2. Loại nguồn, nội dung kế thừa, giới hạn áp dụng của nghiên cứu và định hướng phát triển của bài báo

Nhóm nguồn và loại nội dung	Nội dung kế thừa	Giới hạn áp dụng của nghiên cứu /Định hướng phát triển của bài báo
Lào Cai [12] -nghiên cứu trường hợp cụ thể; Thủ Đức [13] - đề xuất khung	Chiều quản trị, chia sẻ dữ liệu, chu trình điều khiển và phê duyệt của con người.	Kết quả gắn với bối cảnh nghiên cứu; cần kiểm chứng khi vận dụng. // Cụ thể hóa trách nhiệm thực hiện, chuyển giao thông tin và hồ sơ nhiệm vụ.
Bản sao số và AI [14 - 16] - tổng quan	Tích hợp quan trắc, mô hình, cảnh báo; liên thông, trách nhiệm và sự tham gia.	Tổng quan không thay thế bằng chứng kiểm nghiệm thực tế. // Làm rõ điều kiện, giới hạn công cụ và trách nhiệm sử dụng kết quả.
WSUD [17] - nghiên cứu về nguyên tắc thiết kế	Gắn quản lý nước với quy hoạch, không gian trữ, thấm và điều tiết nước.	Phụ thuộc đất đai, lưu vực, duy tu; không trực tiếp đánh giá điều hành số. // Gắn nhiệm vụ với hạ tầng và không gian quản lý nước.
Thích ứng [18] - nghiên cứu chỉ số theo địa bàn	Khía cạnh kinh tế, xã hội, nhận thức rủi ro và hạ tầng.	Chỉ báo, trọng số phụ thuộc bối cảnh. // Lựa chọn khía cạnh đánh giá, xác định dữ liệu và cách đo phù hợp.
PUB [19], World Bank [20] - thông tin chính thức về triển khai	Kết hợp công trình, thông tin và tổ chức ứng phó.	Thông tin triển khai chưa tách được tác động riêng của yếu tố công nghệ. // Liên kết công trình, thông tin và tổ chức vận hành trong hồ sơ nhiệm vụ.

Nguồn: Tác giả tổng hợp và đề xuất định hướng phát triển. Loại nguồn giúp xác định cách sử dụng bằng chứng, không phải thang xếp hạng chất lượng nghiên cứu.

Kinh nghiệm trong và ngoài nước làm rõ các chức năng quản trị: WSUD cung cấp nguyên tắc lồng ghép quản lý nước vào phát triển đô thị [17]; nghiên cứu tại Seoul trên 12 khu vực thoát nước gợi ý xem xét điều kiện thích ứng của cộng đồng [18]. Cơ quan quản lý nước Singapore (PUB) mô tả Hệ thống điều hành lưu vực và mạng lưới sông (CWOS) tại Trung tâm điều hành phối hợp (JOC), hỗ trợ triển khai lực lượng ứng phó [19]. Ngân hàng Thế giới (World Bank) giới thiệu sự kết hợp hạ tầng với FRMIS và nền tảng quy hoạch tại Cần Thơ [20]. Các nguồn cho thấy cần kết hợp hạ tầng, công nghệ số và tổ chức vận hành; chưa đủ thông tin xác định đóng góp riêng của yếu tố công nghệ vào kết quả giảm ngập.

Các tài liệu đã đề cập chu trình phản hồi tại Thủ Đức [13], nhiệm vụ cảnh báo - điều phối tại Hà Nội [6] và các nhóm chỉ số tại Cần Thơ [7]. Kết quả tổng hợp đặt ra yêu cầu cụ thể hóa mối liên hệ giữa những nội dung này trong từng nhiệm vụ quản trị, làm cơ sở đề xuất tại mục 5.

5. ĐỀ XUẤT KHUNG TỔ CHỨC THỰC HIỆN QUẢN TRỊ RỦI RO NGẬP ÚNG

5.1. Cụ thể hóa sáu nhóm nội dung đối với từng nhiệm vụ quản lý

Trên cơ sở kết quả đối chiếu và tổng hợp tại mục 3-4, tác giả cụ thể hóa sáu nhóm nội dung thành khung tổ chức thực hiện, gắn với hồ sơ từng nhiệm vụ (Bảng 3). Các nhóm có quan hệ bổ trợ, không phải sáu bước tuần tự. Hồ sơ làm rõ ai xác nhận kết quả phân tích, kết quả đó phục vụ quyết định nào, ai chịu trách nhiệm thực hiện và phản hồi kết quả. Qua đó, các nội dung được liên kết để theo dõi và kiểm tra quá trình thực hiện nhiệm vụ.

Bảng 3. Các nhóm nội dung và hồ sơ thực hiện nhiệm vụ quản trị rủi ro ngập úng

Nhóm nội dung và căn cứ kế thừa	Nội dung cần xác định	Hồ sơ thực hiện và kiểm tra
(1) Nhiệm vụ và trách nhiệm [1], [6], [7], [12]	Mục tiêu, đối tượng, phạm vi, kết quả dự kiến; đơn vị chủ trì, thẩm quyền quyết định, trách nhiệm thực hiện và phối hợp.	Mô tả nhiệm vụ; phân công trách nhiệm và phối hợp.
(2) Dữ liệu và chia sẻ thông tin [6], [7], [14], [15]	Nguồn và đơn vị phụ trách dữ liệu; chất lượng, cập nhật, chia sẻ; phương án xử lý khi thiếu hoặc gián đoạn dữ liệu.	Danh mục dữ liệu; quy định cung cấp, cập nhật, chia sẻ; phương án dự phòng.
(3) Phân tích và kịch bản [6], [8], [11], [13] -[15]	Yêu cầu phân tích; phương pháp, giả định, điều kiện áp dụng; giới hạn và tính bất định của kết quả.	Kết quả phân tích, kịch bản; thuyết minh phương pháp và đánh giá độ phù hợp.
(4) Quyết định và hành động [1], [6], [9], [13], [19]	Điều kiện kích hoạt hành động; trách nhiệm xác nhận thông tin, thẩm quyền quyết định; trình tự, thời hạn phối hợp và xử lý ngoại lệ.	Quy trình phối hợp; nhật ký quyết định, hành động và phản hồi.
(5) Nguồn lực và sự tham gia [8], [12], [16], [18]	Nhân lực, kinh phí, phương tiện, năng lực vận hành; cơ chế cảnh báo, phản hồi và sự tham gia của các bên.	Kế hoạch nguồn lực, vận hành, bảo trì, đào tạo và truyền tin; cơ chế tiếp nhận phản hồi.
(6) Đánh giá và cập nhật [7], [12], [18]	Chỉ báo, dữ liệu, phương pháp, trách nhiệm và thời điểm đánh giá; căn cứ điều chỉnh.	Hồ sơ đánh giá; kiến nghị điều chỉnh và ghi nhận cập nhật.

Nguồn: Tác giả hệ thống hóa và đề xuất. Các nguồn ở cột đầu hỗ trợ nội dung tương ứng, không có nghĩa từng nguồn đã đề xuất sáu nhóm. Hồ sơ ưu tiên kế thừa tài liệu hiện có; khung chưa xác lập ngưỡng kỹ thuật, trọng số hoặc mức đánh giá.

Đầu mối điều phối đô thị thông minh, đơn vị quản lý thoát nước, chủ quản dữ liệu và cơ quan quyết định ứng phó có thể khác nhau. Cần Thơ giao Sở Xây dựng chủ trì Đề án chung [7], Sở NN&MT chủ trì nhiệm vụ FRMIS [7], trong khi Đà Nẵng gắn cấp, thoát nước với dữ liệu dùng chung và bản sao số môi trường [8]. Vì vậy, hồ sơ nhiệm vụ cần làm rõ quan hệ phối hợp giữa các chủ thể có liên quan trước khi lựa chọn giải pháp số. Việc đầu tư phải gắn với vận hành, bảo trì và cập nhật dữ liệu.

5.2. Tổ chức chuỗi cảnh báo - hành động

Quá trình tổ chức nhiệm vụ gồm:

Xác định nhiệm vụ → kiểm tra dữ liệu → phân tích tình huống → quyết định đúng thẩm quyền → phối hợp hành động → đánh giá, cập nhật.

Quá trình trên bao gồm chuẩn bị, thực hiện và cập nhật nhiệm vụ. Trong đó, chuỗi cảnh báo - hành động được theo dõi theo từng sự kiện. Sáu nhóm tại Bảng 3 tổ chức nội dung hồ sơ. Trách nhiệm và nguồn lực được xem xét xuyên suốt; phản hồi có thể dẫn đến kiểm tra lại dữ liệu hoặc điều chỉnh quyết định.

Bảng 4 minh họa nhiệm vụ cảnh báo ngập gần trường học. Chủ thể được mô tả theo chức năng; cơ quan cụ thể, thẩm quyền, ngưỡng và thời hạn phải xác định theo quy trình địa phương. Đây là minh họa cấu trúc, không phải quy trình đã được phê duyệt hoặc kết quả kiểm chứng.

Bảng 4. Minh họa liên kết hồ sơ trong cảnh báo ngập gần trường học

Khâu	Đầu vào và chủ thể chức năng	Điều kiện chuyển bước và hồ sơ phản hồi
Xác nhận dữ liệu	Đơn vị phụ trách dữ liệu cung cấp thông tin mưa, mực nước, vị trí, thời điểm; đầu mối được giao xác nhận.	Ghi nhận nguồn, thời điểm, kết quả kiểm tra; trường hợp thiếu hoặc mâu thuẫn dữ liệu thì xác minh, dùng kênh dự phòng và xác định giới hạn của thông tin.
Quyết định	Đơn vị chuyên môn phân tích; người có thẩm quyền đối chiếu điều kiện kích hoạt.	Ghi nhận người quyết định, thời điểm, hành động và bên nhận; trường hợp chưa đủ căn cứ thì báo cáo, xử lý theo quy trình.
Chuyển giao và hành động	Đầu mối điều phối chuyển chỉ dẫn tới đơn vị ứng phó và đầu mối thông tin cho trường học.	Ghi nhận người gửi/nhận, xác nhận tiếp nhận, thời hạn và thời điểm bắt đầu hành động; trường hợp không có phản hồi thì liên hệ kênh dự phòng, báo cáo đầu mối.
Đánh giá và cập nhật	Đơn vị thực hiện phản hồi; đầu mối quản lý đối chiếu nhật ký, hiện trường.	Đối chiếu thời gian, thông tin chuyển giao và trách nhiệm với quy trình, sử dụng các chỉ báo tại mục 5.3; ghi kiến nghị điều chỉnh. Phân biệt thiếu nhật ký với chưa hành động.

Nguồn: Minh họa từ khung đề xuất; không quy định thay thẩm quyền, ngưỡng hoặc quy trình của địa phương.

5.3. Phân biệt ba lớp đánh giá

Đề án Cần Thơ phân biệt kết quả đầu ra, hiệu quả và tác động [7]. Kế thừa nguyên tắc phân biệt mức độ kết quả, bài báo đề xuất ba lớp đánh giá đối với từng nhiệm vụ. Thứ nhất, thực hiện yêu cầu: xem xét việc phân công trách nhiệm, chuẩn bị dữ liệu và nguồn lực, xác lập quy trình. Thứ hai, chất lượng hoạt động: xem xét độ chính xác, tính đầy đủ và kịp thời của thông tin, chất lượng ra quyết định và phối hợp hành động. Thứ ba, kết quả đối với đô thị: xem xét mức độ gián đoạn dịch vụ thiết yếu và thiệt hại do ngập. Mỗi lớp cần xác định các chỉ báo phù hợp, hồ sơ làm căn cứ đánh giá và chủ thể chịu trách nhiệm cung cấp thông tin.

Trong phạm vi bài báo, hai chỉ báo khởi đầu được đề xuất cho lớp chất lượng hoạt động. Thứ nhất, thời gian từ xác nhận cảnh báo đến bắt đầu hành động được đo từ thời điểm hoàn tất xác nhận cảnh báo đến thời điểm bắt đầu thực hiện hành động ứng phó được giao. Khoảng đo không bao gồm thời gian phát hiện, xác nhận cảnh báo hoặc thời gian thực hiện hành động. Nếu có nhiều hành động, thời gian được ghi riêng cho từng hành động; trường hợp chưa bắt đầu hoặc thiếu mốc thời gian được báo cáo riêng. Thứ hai, tỷ lệ chuyển giao đầy đủ là số lần chuyển giao đáp ứng yêu cầu chia cho tổng số lần phải chuyển giao theo quy trình. Một lần chuyển giao đáp ứng yêu cầu khi có đủ thông tin bắt buộc, xác định rõ người nhận và có xác nhận tiếp nhận. Khi không phát sinh lần phải chuyển giao, chỉ báo không áp dụng; trường hợp thiếu nhật ký được ghi là chưa xác định, báo cáo riêng và xử lý theo quy tắc thống nhất trước khi tính tỷ lệ. Hai chỉ báo cần được xem xét cùng độ chính xác của

thông tin và tính phù hợp, đúng thẩm quyền của hành động; hiện chưa được đo kiểm hoặc xác lập ngưỡng đánh giá.

Ba lớp đánh giá không đồng nhất với cấp độ trưởng thành đô thị thông minh tại [2]; hồ sơ đầy đủ không chứng minh kết quả giảm rủi ro. Khung chưa đặt trọng số hoặc điểm tổng hợp. Việc đánh giá kết quả cần xét điều kiện mưa, hạ tầng và các yếu tố liên quan, không quy kết riêng tác động cho công nghệ hoặc quy trình khi thiếu căn cứ.

6. ĐÓNG GÓP VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU CHUYÊN SÂU

6.1. Đóng góp và giới hạn của bài báo

Đóng góp của bài báo là đề xuất cấu trúc liên kết và cụ thể hóa yêu cầu quản trị rủi ro ngập úng thành hồ sơ thực hiện từng nhiệm vụ gồm sáu nhóm nội dung, gắn với ba lớp đánh giá. Khung đề xuất kế thừa các nghiên cứu về dữ liệu, mô hình, phối hợp và những nội dung về kịch bản, chỉ số đã được xác định trong các văn bản địa phương. Phần phát triển tập trung vào trách nhiệm của các chủ thể, điều kiện ra quyết định, thông tin chuyển giao và sản phẩm có thể kiểm tra trong bối cảnh quản lý nhà nước tại Việt Nam. Cơ quan trung ương có thể tham khảo để hướng dẫn mô tả nhiệm vụ và hồ sơ phục vụ kiểm tra; địa phương có thể sử dụng để rà soát sự liên kết giữa đề án, kế hoạch, quy trình vận hành, dữ liệu và nguồn lực. Giá trị sử dụng của khung cần được tiếp tục kiểm chứng trong thực tiễn.

Bài báo được xây dựng trên cơ sở tổng quan có chủ đích và đối chiếu tài liệu, chưa sử dụng dữ liệu vận hành để kiểm chứng khung đề xuất. Các nhiệm vụ và hoạt động được nêu trong đề án, kế hoạch của địa phương giúp nhận diện định hướng và nền tảng triển khai, chưa phải bằng chứng về hiệu quả của khung đề xuất. Vì vậy, bài báo dừng ở việc đề xuất khung tổ chức thực hiện và định hướng kiểm chứng, không đưa ra kết luận chung về hiệu quả quản trị ngập úng thực tế của sáu địa phương.

6.2. Định hướng phạm vi và sản phẩm nghiên cứu tiếp theo

Hướng nghiên cứu tiếp theo là cụ thể hóa và kiểm chứng khung qua chuỗi cảnh báo - hành động tại một hoặc một số đô thị, theo khả năng tiếp cận hồ sơ và dữ liệu. Câu hỏi trọng tâm là cần phân định trách nhiệm, xác định điều kiện kích hoạt và thiết lập cơ chế phản hồi như thế nào để cảnh báo chuyển thành hành động kịp thời. Phạm vi có thể giới hạn ở một lưu vực hoặc khu vực có rủi ro, không nhất thiết bao gồm cả sáu địa phương đã đối chiếu.

Sản phẩm dự kiến gồm quy trình phối hợp, hồ sơ theo sáu nhóm và bộ chỉ báo cho ba lớp đánh giá. Các chỉ báo ưu tiên là thời gian từ xác nhận cảnh báo đến bắt đầu hành động, tỷ lệ chuyển giao đầy đủ theo mục 5.3 và mức độ ghi nhận trách nhiệm. Đánh giá giảm thiệt hại chỉ thực hiện khi có đủ dữ liệu và phương pháp phù hợp.

Phân tích hồ sơ và phỏng vấn các bên liên quan giúp xây dựng, điều chỉnh quy trình trước khi thử nghiệm trong diễn tập hoặc sự kiện phù hợp. Nhật ký dùng đối chiếu quá trình thực hiện và đánh giá chỉ báo; phân biệt kết quả diễn tập với vận hành thực tế. Nghiên cứu tại một đô thị cho phép kiểm chứng sâu quy trình; mở rộng sang một số đô thị giúp xem xét khả năng áp dụng và điều chỉnh theo bối cảnh.

7. KẾT LUẬN

Tổng quan và đối chiếu 20 tài liệu làm rõ mối liên hệ giữa yêu cầu quản lý, nhiệm vụ trong đề án, kế hoạch của sáu địa phương và kết quả nghiên cứu có thể kế thừa trong quản trị rủi ro ngập úng. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất khung tổ chức thực hiện gồm sáu nhóm nội dung, gắn với hồ sơ từng nhiệm vụ và ba lớp đánh giá. Đóng góp của bài báo là cụ thể hóa các nội dung kế thừa thành cấu trúc liên kết có thể kiểm tra giữa dữ liệu đầu vào, trách nhiệm xác nhận, điều kiện ra quyết định, chuyển giao thông tin và hồ sơ thực hiện. Khung cung cấp cơ sở tham khảo cho việc phân công, phối hợp thực hiện và kiểm tra trong quản lý nhà nước về phát triển đô thị thông minh. Tình huống cảnh báo ngập minh họa cách sử dụng khung, chưa chứng minh hiệu quả thực tế. Khung đề xuất cần được áp dụng thử nghiệm và đánh giá tại một hoặc một số đô thị trước khi kết luận về tính phù hợp, khả thi và hiệu quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chính phủ. Nghị định số 269/2025/NĐ-CP ngày 14/10/2025 về phát triển đô thị thông minh, Hà Nội, 2025.

[2] Bộ Xây dựng. Thông tư số 03/2026/TT-BXD ngày 28/1/2026 hướng dẫn một số điều của Nghị định về phát triển đô thị thông minh, Hà Nội, 2026.

[3] Bộ Xây dựng. Báo cáo số 313/BC-BXD ngày 15/11/2025 về thực trạng ngập úng tại các đô thị, nguyên nhân và định hướng giải pháp chống ngập, Hà Nội, 2025.

[4] Nguyễn Hồng Tiến. Kiểm soát ngập úng và phục hồi các dòng sông ở Hà Nội góp phần tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu. Tạp chí Cấp thoát nước Việt Nam, số 190, tr. 56-65, 2026.

[5] UBND TP Hồ Chí Minh. Quyết định số 4714/QĐ-UBND ngày 29/7/2026 phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh tại TP Hồ Chí Minh giai đoạn 2026 - 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2026.

[6] UBND TP Hà Nội. Quyết định số 750/QĐ-UBND ngày 13/2/2026 về việc ban hành Đề án đô thị Hà Nội thông minh, 2026.

[7] UBND TP Cần Thơ. Quyết định số 323/QĐ-UBND ngày 23/1/2026 phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh TP Cần Thơ giai đoạn 2026 - 2030, tầm nhìn đến năm 2040, 2026.

[8] UBND TP Đà Nẵng. Quyết định số 3292/QĐ-UBND ngày 30/12/2025 ban hành Đề án chuyển đổi số góp phần thúc đẩy, tạo động lực phát triển kinh tế - xã hội TP Đà Nẵng giai đoạn 2026 - 2030, định hướng đến năm 2035, 2025.

[9] UBND TP Huế. Kế hoạch số 334/KH-UBND ngày 12/6/2026 triển khai Đề án phát triển đô thị thông minh TP Huế giai đoạn 2026 - 2030, định hướng đến năm 2045, 2026.

[10] UBND TP Huế. Quyết định số 465/QĐ-UBND ngày 28/1/2026 phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh TP Huế giai đoạn 2026 - 2030, định hướng đến năm 2045, 2026.

[11] UBND TP Hải Phòng. Quyết định số 3007/QĐ-UBND ngày 30/7/2026 phê duyệt Đề án đô thị thông minh TP Hải Phòng, 2026.

[12] Ngo, H. V., Do, H. Flood Risk Management Through Digital Transformation in Connection with Smart Urban Development Management: A Case of Lao Cai City of Vietnam. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, vol, 15, no. 3, pp. 40-49, 2024.

[13] Thinh, N. T. P., Quang, C. N. X., Hieu, L. N. The smart city paradox: Flood resilience in the making of Thu Duc City, Viet Nam. City and Environment Interactions, 29, art. 100323, 2026.

[14] Altındaş, G., Dane, G., Baba, A. Urban digital twins and water sensitive urban design: A systematic literature review. Sustainable Cities and Society, 145, art. 107456, 2026.

[15] Hlal, M. et al. Digital Twin Technology for Urban Flood Risk Management: A Systematic Review of Remote Sensing Applications and Early Warning Systems. Remote Sensing, 17, art. 3104, 2025.

[16] Bhanye, J. Flood-tech frontiers: smart but just? A systematic review of AI-driven urban flood adaptation and associated governance challenges. Discover Global Society, 3, art. 59, 2025.

[17] Nguyễn Quốc Thắng. Thiết kế đô thị nhạy cảm với nước (WSUD) - Bài học điều tiết nước và giảm thiểu ngập lụt đô thị. Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Kỹ thuật và Công nghệ, vol. 132, no. 2A, tr. 75-92, 2023.

[18] Song, S. M., Park, H. J., Kim, D. H., Lee, S. O. Preliminary Study on the Urban Flood Adaptive Capacity Index. Applied Sciences, 15, art. 9118, 2025.

[19] PUB. Flood Forecasting and Monitoring, 2026. Internet: https://www.pub.gov.sg/Public/KeyInitiatives/Flood-Resilience/Flood-Forecasting-and-Monitoring (truy cập: tháng 8/2026).

[20] World Bank. New Infrastructure Protects Viet Nam's Mekong Delta City from Chronic Floods, 2025. Internet: https://www.worldbank.org/en/news/feature/2025/08/12/new-infrastructure-protects-viet-nam-s-mekong-delta-city-from-chronic-floods (truy cập: tháng 8/2026).

■Ngày nhận bài: 12/8/2026 ■Ngày sửa bài: 23/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 30/8/2026

Phương pháp tiếp cận từ dưới lên trong đồ án tái phát triển khu chung cư cũ ở Hà Nội

A Bottom-Up approach to the redevelopment planning of old apartment complexes in Hanoi

> THS LÊ NGỌC HẢI[1,*], TS TRẦN XUÂN HIẾU[1], TS LÊ MINH KHUÊ[1], TS VƯƠNG XUÂN CẦN[2]
[1]Nhóm chuyên môn Quy hoạch, Khoa Kiến trúc và Quy hoạch, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: ngochai.arc@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo này áp dụng phương pháp tiếp cận từ dưới lên có kiểm soát cho đồ án tái phát triển khu chung cư cũ ở Hà Nội dựa trên cơ sở chuyển đổi sự tham gia của cộng đồng từ hoạt động tham vấn cuối kỳ thành một cơ chế cung cấp dữ liệu, đồng kiến tạo kịch bản và giám sát liên tục. Nội dung chính tập trung vào xây dựng (i) quy trình kỹ thuật 5 giai đoạn từ khởi tạo đến giám sát - điều chỉnh; (ii) quy trình pháp lý 6 nhóm công việc từ lập nhiệm vụ đến tổ chức thực hiện; và (iii) mô hình tích hợp xác định rõ các điểm chèn kỹ thuật, sản phẩm trung gian, chủ thể chịu trách nhiệm và điều kiện chuyển bước. Kết quả cho thấy, phương pháp tiếp cận từ dưới lên có kiểm soát không thay thế hệ thống pháp định mà bổ sung một lớp phản hồi có cấu trúc, giúp thông tin từ cư dân, thị trường và chính sách được hấp thụ trở lại kịch bản quy hoạch. Kết quả này góp phần tăng tính minh bạch, tính đồng thuận, tính khả thi và khả năng thích ứng của đồ án tái phát triển khu chung cư cũ.

Từ khóa: Phương pháp tiếp cận từ dưới lên; tái phát triển khu chung cư cũ; quy trình kỹ thuật; quy trình pháp lý; Hà Nội.

ABSTRACT

This paper applies a controlled bottom-up approach for old apartment regeneration projects in Hanoi by transforming community participation from a final-stage consultation activity into a continuous mechanism for data provision, scenario co-creation, and monitoring. The study focuses on establishing: (i) a five-stage technical process from project initiation to monitoring and adjustment; (ii) a legal process structured into six functional groups from planning-task preparation to implementation; and (iii) an integrated model specifying technical insertion points, intermediate outputs, accountable actors, and stage-transition conditions. The findings indicate that a bottom-up approach does not replace statutory planning procedures but adds a structured feedback layer through which community, market, and policy information can be reintroduced into planning scenarios. Ultimately, this approach improves transparency, consensus building, feasibility, and adaptability in old apartment regeneration planning.

Keywords: Bottom-up approach; old apartment regeneration; technical process; legal process; Hanoi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo thống kê, Hà Nội có khoảng 1.579 chung cư cũ với phần lớn diện tích căn hộ nhỏ hơn 30 m^2. Các chung cư cũ này không thỏa mãn diện tích ở của người dân cũng như các tiêu chuẩn liên quan đến an toàn kết cấu công trình và hạ tầng kỹ thuật. Năm 2021, thành phố đã ban hành đề án cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ với các kế hoạch, tiến độ thực hiện cụ thể. Tuy nhiên, tính đến năm 2023 mới chỉ đạt 1,14% so với kế hoạch [1].

Các khu chung cư và tập thể cũ của Hà Nội có đặc điểm đặc thù riêng và cần có mô hình tái thiết đô thị phù hợp hơn là chỉ đơn thuần thay thế chúng bằng các công trình nhà cao tầng [2 - 4]. Việc tái phát triển khu chung cư cũ tại Hà Nội là một bài toán quy hoạch tồn tại mức độ bất định và khả năng xung đột lợi ích cao. Đồ án quy hoạch đồng thời phải xử lý yêu cầu an toàn công trình, bảo đảm chỗ ở và quyền tài sản của cư dân, cân đối hiệu quả đầu tư, đáp ứng chỉ tiêu hạ tầng và tuân thủ hệ thống quy hoạch cấp trên. Khi các quyết định chủ yếu được hình thành theo tuyến hành chính-kỹ thuật một chiều, cộng đồng thường chỉ tiếp cận phương án ở giai đoạn lấy ý kiến. Vì vậy, phản hồi xuất hiện muộn, khó truy nguyên về dữ liệu đầu vào và dễ chuyển thành xung đột tại giai đoạn thực hiện.

Các lý thuyết quy hoạch tham gia chỉ ra rằng, mức độ tham gia không nên được đánh giá bằng số cuộc họp mà bằng khả năng tác động thực chất của người dân đến quyết định [5]. Quy hoạch cộng tác tiếp tục nhấn mạnh quá trình tạo lập tri thức chung và giải quyết vấn đề phức hợp thông qua tương tác đa chủ thể [6, 7]. Tuy nhiên, nếu thiếu một quy trình kỹ thuật và vị trí pháp lý rõ ràng, cách tiếp cận từ dưới lên (bottom-up approach) có thể chỉ dừng ở tham vấn hình thức hoặc tạo kỳ vọng vượt quá thẩm quyền của cộng đồng. Vì vậy, vấn đề nghiên cứu không phải là lựa chọn cách tiếp cận từ trên xuống (top-down approach) hoặc từ dưới lên, mà là thiết kế một cơ chế tiếp cận từ dưới lên có kiểm soát, có khả năng cung cấp dữ liệu và phản hồi cho quy trình pháp định nhưng không làm thay đổi thẩm quyền phê duyệt.

Đến nay, vấn đề tái phát triển khu chung cư cũ tại Hà Nội theo hướng tiếp cận từ dưới lên cũng thu hút được sự quan tâm của một

số học giả. Điển hình như, trong nghiên cứu [1], các tác giả đã thực hiện khảo sát sự mong muốn và sự quan tâm của người dân về các kịch bản cải tạo xây dựng chung cư cũ. Trong nghiên cứu [8], tác giả tập trung xem xét vai trò của người dân trong quá trình cải tạo chung cư. Trên cơ sở phân tích ở trên, bài viết này tập trung trả lời ba câu hỏi nghiên cứu như sau: (1) Quy trình kỹ thuật của việc tiếp cận từ dưới lên cần những giai đoạn nào? (2) Các hoạt động tham gia được lồng ghép vào quy trình pháp lý ở đâu? (3) Hai quy trình này được phối hợp thế nào trong một mô hình thống nhất, có thể kiểm soát đầu vào, đầu ra và trách nhiệm của từng chủ thể?

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Sơ lược về phương pháp tiếp cận từ dưới lên và khung nghiên cứu

Phương pháp tiếp cận từ dưới lên (bottom-up approach) ở đây được hiểu là cách tổ chức quá trình quy hoạch. Trong đó, thông tin, nhu cầu và phản hồi từ cấp cộng đồng và các chủ thể thực thi được đưa vào từ giai đoạn xác định vấn đề, tiếp tục tham gia hình thành, đánh giá và điều chỉnh phương án. "Có kiểm soát" trong cách tiếp cận này được thể hiện ở 4 giới hạn sau đây: (1) tuân thủ quy hoạch cấp trên và quy chuẩn; (2) sử dụng dữ liệu có nguồn gốc và phương pháp chuẩn hóa; (3) phân định rõ quyền đề xuất, quyền phản biện và quyền quyết định; và (4) mọi thay đổi sau phê duyệt phải thực hiện theo trình tự điều chỉnh pháp định. Điều này sẽ tránh được sự tránh đồng nhất "tiếp cận từ dưới lên" với việc chuyển toàn bộ quyền quyết định cho cộng đồng.

Khung lý thuyết trong nghiên cứu này được kế thừa từ nấc thang tham gia của Arnstein [5], quy hoạch cộng tác của Healey [6], và lý tính cộng tác của Innes và Booher [7]. Điểm phát triển của nghiên cứu này là thể chế hóa sự tham gia thành chuỗi dữ liệu - kịch bản - tham vấn - giám sát. Trong đó, phản hồi có thể được truy vết và liên kết với chỉ tiêu quy hoạch, thay vì chỉ tổng hợp thành biên bản ý kiến.

Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng tiếp cận đến khung pháp lý hiện hành, bao gồm Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15, có hiệu lực từ ngày 01/7/2025 [9], đã được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 144/2025/QH15 [10]; Nghị định số 178/2025/NĐ-CP [11], được sửa đổi bởi Nghị định số 34/2026/NĐ-CP [12]; và Thông tư số 16/2025/TT-BXD [13]. Các văn bản này điều chỉnh hệ thống, căn cứ, nội dung, lấy ý kiến, thẩm định, phê duyệt, công bố và cơ sở dữ liệu quy hoạch đô thị và nông thôn. Đối với cải tạo, xây dựng lại nhà chung cư, Luật Nhà ở số 27/2023/QH15 và Nghị định số 98/2024/NĐ-CP tạo khung chuyên ngành về kế hoạch cải tạo, lựa chọn chủ đầu tư, bồi thường, hỗ trợ, tái định cư và tổ chức thực hiện [14, 15].

Thêm vào đó, cơ chế tham gia và công khai còn được hỗ trợ bởi Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở số 10/2022/QH15, đã được sửa đổi năm 2025 [16, 17]. Đối với dữ liệu cư dân và nền tảng số, Luật Dữ liệu số 60/2024/QH15, Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân số 91/2025/QH15 và Nghị định số 356/2025/NĐ-CP yêu cầu việc thu thập, xử lý, chia sẻ và bảo vệ dữ liệu phải có căn cứ, mục đích, phạm vi và biện pháp an toàn phù hợp [18 - 20]. Do vậy, pháp luật hiện hành đã tạo không gian cho công khai, lấy ý kiến, số hóa dữ liệu và điều chỉnh quy hoạch; song phương pháp tiếp cận từ dưới lên vẫn phải được xác định là phương pháp hỗ trợ lập và ra quyết định, không phải một thủ tục thay thế quy trình pháp định.

2.2. Thiết kế nghiên cứu

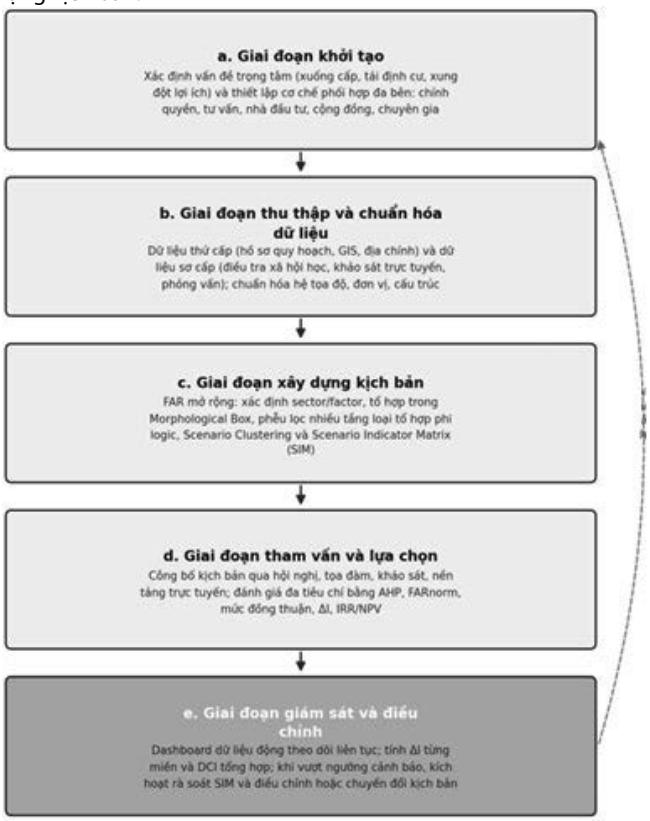
Để trả lời được các câu hỏi nghiên cứu, bài viết này thực hiện theo trình tự các bước như sau:

- Bước 1: Xác định giai đoạn kỹ thuật, chủ thể, luồng thông tin và điều kiện áp dụng.
- Bước 2: Phân tích văn bản pháp luật theo chức năng để xác định các điểm có thể lồng ghép tham vấn và sản phẩm kỹ thuật.
- Bước 3: Lập ma trận đối sánh giữa các giai đoạn kỹ thuật và công việc pháp lý.
- Bước 4: Tổng hợp mô hình thống nhất và kiểm tra tính nhất quán theo ba tiêu chí: không thay đổi thẩm quyền pháp định, mỗi điểm chèn có sản phẩm kiểm chứng được và có vòng phản hồi sau phê duyệt.

2.3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

2.3.1. Thiết lập quy trình kỹ thuật 5 giai đoạn

Trước tiên, một quy trình kỹ thuật được thiết lập dựa trên 5 giai đoạn liên tiếp nhưng không tuyến tính tuyệt đối (Hình 1). Giai đoạn 1 (Khởi tạo) nhằm xác định phạm vi, vấn đề trọng tâm, mục tiêu và cơ chế phối hợp. Giai đoạn 2 (thu thập và chuẩn hóa dữ liệu) tích hợp dữ liệu pháp lý, không gian, kinh tế, xã hội và môi trường, đồng thời chuẩn hóa đơn vị, thời điểm và nguồn. Giai đoạn 3 (xây dựng kịch bản) hình thành tập phương án, kiểm tra tương thích, lượng hóa chỉ tiêu và đánh giá khả thi. Giai đoạn 4 (tham vấn và lựa chọn) công khai các kịch bản, giải thích đánh đổi, ghi nhận phản hồi và hoàn thiện phương án. Giai đoạn 5 (giám sát và điều chỉnh) theo dõi chỉ báo trong quá trình thực hiện; khi điều kiện thay đổi vượt ngưỡng, kết quả giám sát phản hồi về giai đoạn dữ liệu hoặc xây dựng kịch bản.



Hình 1. Quy trình kỹ thuật 5 giai đoạn theo tiếp cận từ dưới lên

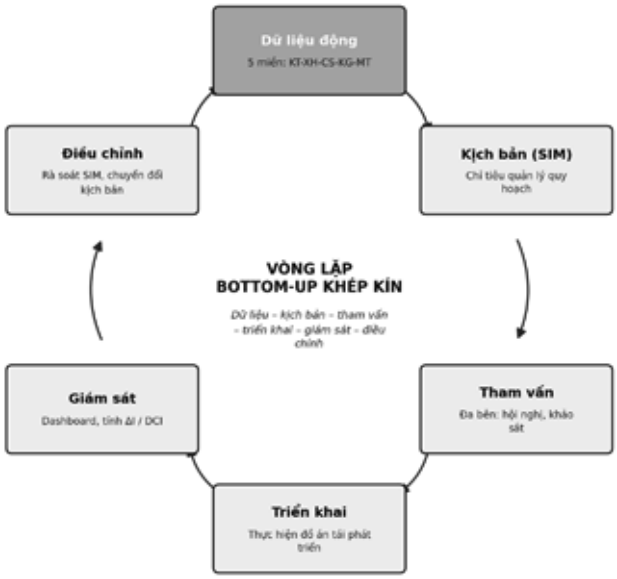
Trong quy trình kỹ thuật này, chính quyền xác lập phạm vi, cung cấp dữ liệu pháp lý, điều phối tham vấn và thực hiện thẩm quyền phê duyệt. Tư vấn và chuyên gia thiết kế khảo sát, vận hành, phân tích và lượng hóa. Doanh nghiệp cung cấp dữ liệu chi phí-dòng tiền và kiểm tra khả thi. Cộng đồng cư dân cung cấp dữ liệu xã hội, phản ánh nhu cầu, tham gia đánh giá và giám sát (Bảng 1). Theo đó, không có chủ thể nào sở hữu toàn bộ chuỗi thông tin. Vì vậy, chất lượng phương án phụ thuộc vào cơ chế trao đổi và kiểm chứng chéo.

Bảng 1. Phân công vai trò các chủ thể theo giai đoạn

	a. Khởi tạo	b. Thu thập & chuẩn hóa dữ liệu	c. Xây dựng kịch bản	d. Tham vấn & lựa chọn	e. Giám sát & điều chỉnh
Chính quyền	Xác nhận phạm vi, vấn đề trọng tâm	Cung cấp dữ liệu thứ cấp (hồ sơ QH, địa chính)	Giám sát tính hợp pháp của tổ hợp kịch bản	Điều phối tham vấn, phê duyệt kịch bản	Kích hoạt rà soát khi ΔI / DCI vượt ngưỡng
Chuyên gia / tư vấn	Xác định field nghiên cứu	Thiết kế công cụ khảo sát, chuẩn hóa dữ liệu	Vận hành FAR mở rộng, phễu lọc, SIM	Phân tích AHP, FARnorm, trình bày kịch bản	Vận hành dashboard, tính ΔI / DCI
Doanh nghiệp / nhà đầu tư	Nêu ràng buộc tài chính đầu tư	Cung cấp dữ liệu chi phí, khả năng huy động vốn	Đánh giá khả thi tài chính của factor	Đánh giá IRR, NPV, chi phí đầu tư	Phản hồi biến động thị trường thực tế
Cộng đồng cư dân	Nêu vấn đề từ góc nhìn cư dân	Cung cấp dữ liệu sơ cấp: điều tra XHH, khảo sát trực tuyến	Dữ liệu được hấp thụ vào factor xã hội	Tham gia hội nghị, tọa đàm, nêu mức đồng thuận	Phản hồi qua kênh trực tuyến khi điều chỉnh kịch bản

2.3.2. Thiết lập vòng phản hồi và cơ chế đồng kiến tạo

Khác với quy trình kết thúc tại quyết định phê duyệt, nghiên cứu này đề xuất duy trì một vòng phản hồi gồm dữ liệu động, kịch bản, tham vấn, triển khai, giám sát và điều chỉnh (Hình 2). Dữ liệu mới không tự động làm thay đổi đồ án quy hoạch, chúng trước hết tạo tín hiệu rà soát. Chỉ khi tín hiệu được xác minh, ảnh hưởng đến chỉ tiêu hoặc tính khả thi và đáp ứng điều kiện pháp lý, cơ quan có thẩm quyền mới xem xét điều chỉnh. Cấu trúc này vừa bảo đảm tính thích ứng vừa ngăn biến động ngắn hạn gây thay đổi tùy tiện.



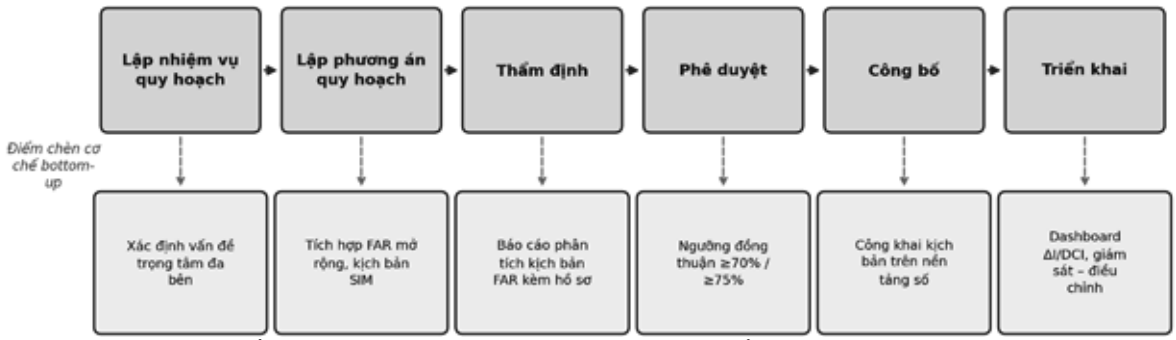
Hình 2. Vòng lặp phản hồi khép kín *(ΔI - Chỉ số định lượng mức độ biến động của dữ liệu; DCI- Chỉ số biến động tổng hợp dùng để xác định ngưỡng thích ứng; SIM- Ma trận chỉ báo kịch bản)*

Sự tham gia được tổ chức theo hai chiều mà mỗi chủ thể vừa cung cấp đầu vào, vừa nhận lại sản phẩm đã xử lý để xác nhận, phản biện hoặc thực hiện. Cư dân không chỉ trả lời khảo sát mà còn được tiếp cận các kịch bản và hệ quả của từng lựa chọn. Doanh nghiệp không chỉ đề xuất chỉ tiêu mà phải công khai giả định tài chính. Tư vấn không chỉ lập bản vẽ mà còn phải giải trình cách chuyển dữ liệu thành chỉ tiêu. Chính quyền không chỉ phê duyệt mà còn bảo đảm dữ liệu, quy trình và kết quả tham vấn được lưu vết. Đây là nội dung "đồng kiến tạo có trách nhiệm" mà quyền tham gia luôn đi cùng nghĩa vụ cung cấp thông tin có thể kiểm chứng.

2.3.3. Thiết lập quy trình pháp lý và các điểm chèn theo hướng tiếp cận từ dưới lên

Trên phương diện chức năng, quá trình pháp định của một đồ án quy hoạch chi tiết phục vụ tái phát triển có thể được hệ thống thành sáu nhóm công việc: lập nhiệm vụ, lập phương án, thẩm định, phê duyệt, công bố và triển khai (Hình 3). Cách hệ thống hóa này không tạo thêm thủ tục hành chính mà xác định vị trí cho các sản phẩm tiếp cận theo hướng từ dưới lên trong hồ sơ và quá trình ra quyết định (Bảng 2).

Trong quy trình này, ở bước lập nhiệm vụ, dữ liệu cộng đồng giúp xác định đúng vấn đề và phạm vi tác động. Khi lập phương án, các kịch bản được kiểm tra đồng thời theo quy chuẩn, lợi ích xã hội và khả năng đầu tư. Khi thẩm định, báo cáo dữ liệu - kịch bản - tham vấn là tài liệu giải trình, không thay thế thành phần hồ sơ bắt buộc. Ở thời điểm phê duyệt, cơ quan có thẩm quyền quyết định trên cơ sở pháp luật và kết quả thẩm định. Sau phê duyệt, công bố và giám sát tạo điều kiện phát hiện sớm sai lệch. Nếu cần điều chỉnh, thủ tục phải tuân theo pháp luật quy hoạch hiện hành.



Hình 3. Sáu nhóm công việc pháp lý và các điểm chèn cơ chế tiếp cận từ dưới lên *(FAR -Phương pháp phân tích, tổ hợp và sàng lọc kịch bản)*

Bảng 2. Ma trận lồng ghép điểm chèn kỹ thuật vào quy trình pháp lý

Nhóm công việc pháp lý	Điểm chèn	Sản phẩm kiểm chứng	Chủ thể chịu trách nhiệm
1. Lập nhiệm vụ	Khảo sát đa bên; bản đồ vấn đề; xác định nhóm chịu tác động	Báo cáo khởi tạo; danh mục dữ liệu; kế hoạch tham gia	Cơ quan tổ chức lập/chính quyền
2. Lập phương án	Đồng xây dựng và so sánh kịch bản; kiểm tra quy chuẩn và khả thi	Tập kịch bản; ma trận chỉ tiêu; báo cáo đánh đổi	Tư vấn chủ trì, các bên cung cấp dữ liệu
3. Thẩm định	Đính kèm báo cáo phương pháp, dữ liệu, kết quả tham vấn và ý kiến khác biệt	Báo cáo giải trình; hồ sơ truy vết dữ liệu–chỉ tiêu	Cơ quan thẩm định/Hội đồng thẩm định
4. Phê duyệt	Xác nhận tuân thủ; công khai căn cứ lựa chọn; phân định nội dung bắt buộc và thích ứng	Quyết định và hồ sơ kèm theo; ngưỡng theo dõi	Cơ quan có thẩm quyền phê duyệt
5. Công bố	Công bố bản đồ, chỉ tiêu, lộ trình và kênh phản hồi ở định dạng dễ tiếp cận	Hồ sơ công bố; dữ liệu mở phù hợp; nhật ký phản hồi	Cơ quan công bố/chính quyền địa phương
6. Triển khai (Thực hiện - theo dõi)	Giám sát chỉ báo; đối thoại định kỳ; kích hoạt rà soát khi có dấu hiệu tới hạn	Bảng theo dõi; báo cáo giám sát; đề xuất điều chỉnh	Chính quyền và Ban điều phối

2.3.4. Thiết lập điều kiện áp dụng

Mô hình chỉ vận hành khi đồng thời đáp ứng ba nhóm điều kiện sau đây: Thứ nhất, điều kiện pháp lý yêu cầu xác định quy hoạch kịch bản thích ứng động (Dynamic Adaptive Scenario Planning, DASP) và hướng tiếp cận từ dưới lên (Bottom-up approach) là công cụ hỗ trợ, không làm thay đổi thẩm quyền hay giá trị pháp lý của đồ án. Thứ hai, điều kiện dữ liệu yêu cầu danh mục biến, nguồn, thời điểm, quyền truy cập, quy tắc chuẩn hóa và biện pháp bảo vệ dữ liệu cá nhân. Thứ ba, điều kiện tổ chức yêu cầu có đầu mối điều phối, lịch tham gia, cơ chế giải trình và nguồn lực duy trì giám sát (Hình 4). Thiếu một trong ba nhóm, quy trình có thể hợp pháp nhưng hình thức, giàu dữ liệu nhưng thiếu trách nhiệm, hoặc có tổ chức nhưng không đủ căn cứ ra quyết định.

Hình 4. Điều kiện áp dụng công cụ hỗ trợ quyết định trong tái phát triển khu chung cư cũ

2.3.5. Mô hình tổ chức và phối hợp thống nhất

Nghiên cứu này đề xuất thành lập Ban điều phối theo từng đồ án như một cơ chế phối hợp hành chính-kỹ thuật, không phải cơ quan phê duyệt mới (Hình 5). Thành phần gồm cơ quan quản lý quy hoạch và chính quyền địa phương, đơn vị tư vấn, nhà đầu tư hoặc doanh nghiệp, đại diện cộng đồng cư dân và chuyên gia độc lập. Cơ quan nhà nước giữ vai trò pháp lý và điều phối, tức đóng vai trò chủ đạo [21]. Tư vấn chịu trách nhiệm về phương pháp. Doanh nghiệp chịu trách nhiệm về dữ liệu đầu tư. Đại diện cư dân chịu trách nhiệm về việc tập hợp và phản hồi nhu cầu. Chuyên gia độc lập kiểm tra tính hợp lệ của quy trình và kết quả.

Hình 5. Cơ cấu tổ chức và phân vai của Ban điều phối

Mô hình thống nhất vận hành bằng các "cửa kiểm soát". Một giai đoạn kỹ thuật chỉ được chuyển sang bước tiếp theo khi đầu ra đã được xác nhận về chất lượng dữ liệu, tuân thủ pháp luật và trách nhiệm của chủ thể. Ngược lại, khi một quyết định pháp lý cần bổ sung căn cứ, hồ sơ được phản hồi đúng giai đoạn kỹ thuật thay vì được xử lý bằng cách điều chỉnh bản vẽ rời rạc. Quan hệ này tạo ra hai vòng phản hồi: vòng ngắn trong quá trình lập đồ án để sửa dữ liệu và kịch bản; vòng dài sau phê duyệt để theo dõi, rà soát và khởi động thủ tục điều chỉnh khi cần thiết.

Bảng 3. Mô hình phối hợp thống nhất giữa quy trình kỹ thuật và quy trình pháp lý

Tiến trình kỹ thuật	Vị trí pháp lý	Đầu ra tích hợp	Cửa kiểm soát
Khởi tạo kỹ thuật	Lập nhiệm vụ	Bản đồ vấn đề, phạm vi, chủ thể, kế hoạch dữ liệu	Chấp thuận chuyển sang thu thập dữ liệu
Thu thập -chuẩn hóa	Lập nhiệm vụ/lập phương án	Cơ sở dữ liệu đã kiểm tra nguồn và quyền sử dụng	Đủ dữ liệu tối thiểu; sai lệch được ghi nhận
Xây dựng kịch bản	Lập phương án	Kịch bản, chỉ tiêu, đánh giá tuân thủ và khả thi	Loại xung đột cứng; giữ phương án có thể giải trình
Tham vấn -lựa chọn	Lập phương án/thẩm định/phê duyệt	Biên bản, dữ liệu phản hồi, báo cáo giải trình	Đáp ứng điều kiện pháp luật và tiêu chí lựa chọn
Giám sát -điều chỉnh	Công bố/thực hiện/điều chỉnh	Bảng theo dõi, cảnh báo, kiến nghị xử lý	Duy trì, hiệu chỉnh tham số hoặc khởi động thủ tục điều chỉnh

2.3.6. Bàn luận

Với các kết quả như trên, nghiên cứu này đã có một số đóng góp cụ thể như sau:

Thứ nhất, chuyển hướng tiếp cận "bottom-up" từ nguyên tắc định tính thành quy trình có sản phẩm và trách nhiệm. Giá trị của việc tham gia không chỉ nằm ở tỷ lệ đồng ý mà còn ở khả năng truy vết nguồn thông tin, cách chuẩn hóa, ảnh hưởng đến chỉ tiêu và lý do tiếp thu hoặc không tiếp thu. Điều này đặc biệt quan trọng tại khu chung cư cũ, nơi "cộng đồng" bao gồm nhiều nhóm lợi ích khác nhau.

Thứ hai, giải quyết quan hệ giữa tính linh hoạt về kỹ thuật và ổn định về pháp lý. Quy trình kỹ thuật có thể lặp lại nhiều lần để học hỏi từ dữ liệu, nhưng sản phẩm pháp lý chỉ thay đổi thông qua thẩm quyền và trình tự được luật định. Vì vậy, "dashboard" hoặc chỉ số cảnh báo không phải là quyết định điều chỉnh quy hoạch; chúng là căn cứ để cơ quan có thẩm quyền lựa chọn duy trì, yêu cầu giải trình hoặc khởi động rà soát. Ranh giới này giúp mô hình tránh hai cực đoan: quy hoạch cứng, không phản ứng với thực tiễn hoặc quy hoạch biến động tùy tiện theo từng phản hồi ngắn hạn.

Thứ ba, tạo một cơ chế phối hợp khả thi trong điều kiện quản lý hiện hành. Ban điều phối có thể được thiết lập dưới hình thức tổ công tác hoặc cơ chế phối hợp của cơ quan tổ chức lập quy hoạch, không nhất thiết hình thành thiết chế pháp lý mới. Tuy nhiên, để áp dụng thực tế, cần tiếp tục chuẩn hóa biểu mẫu dữ liệu, quy chế lựa chọn đại diện cư dân, cơ chế xử lý ý kiến thiểu số, tiêu chí độc lập của chuyên gia và chi phí duy trì hệ thống giám sát. Các ngưỡng tham gia, biểu quyết và điều kiện lựa chọn chủ đầu tư phải được xác định theo đúng trường hợp pháp lý cụ thể của dự án, không nên giản lược thành một tỷ lệ đồng thuận chung cho mọi quyết định.

3. KẾT LUẬN

Phương pháp tiếp cận từ dưới lên có kiểm soát trong tái phát triển khu chung cư cũ không thay thế quy hoạch từ trên xuống và không chuyển thẩm quyền pháp lý từ cơ quan nhà nước sang cộng đồng. Giá trị của phương pháp tiếp cận này nằm ở việc bổ sung một cấu trúc tham gia xuyên suốt. Trong đó, cộng đồng, doanh nghiệp, tư vấn và chuyên gia cùng cung cấp và kiểm chứng thông tin. Cơ quan nhà nước điều phối, thẩm định và quyết định theo pháp luật. Quy trình kỹ thuật năm giai đoạn được liên kết với sáu nhóm công việc pháp lý thông qua các điểm chèn, sản phẩm kiểm chứng và cửa kiểm soát, tạo thành mô hình thống nhất từ khởi tạo đến giám sát-điều chỉnh.

Để triển khai theo hướng tiếp cận từ dưới lên được đề xuất ở đây, nghiên cứu này kiến nghị: (1) ban hành hướng dẫn thí điểm lồng ghép báo cáo dữ liệu - kịch bản - tham vấn trong hồ sơ quy hoạch chi tiết khu chung cư cũ; (2) thiết lập Ban điều phối theo từng đồ án; (3) chuẩn hóa nền tảng công bố và phản hồi số gắn với bảo vệ dữ liệu cá nhân; (4) quy định rõ cơ chế giải trình đối với ý kiến không được tiếp thu; và (5) đánh giá mô hình qua một số dự án thí điểm tại Hà Nội trước khi nhân rộng. Việc áp dụng cần thường xuyên đối chiếu với các sửa đổi pháp luật mới, đặc biệt về thẩm quyền trong mô hình chính quyền địa phương hai cấp, trình tự quy hoạch, nhà ở và dữ liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Thị Thúy, Dương Thị Huyền Trang, Đặng Hải Dương. Nghiên cứu sự quan tâm của người dân về kịch bản cải tạo, xây dựng lại chung cư cũ tại Hà Nội. Tạp chí Xây dựng, số 12, tr. 88-91, 2024.

[2] Nguyễn Tất Thắng. Xây dựng lại nhà chung cư cũ trong nội đô Hà Nội bằng cơ chế, chính sách và giải pháp quy hoạch kiến trúc thích hợp. Nghiên cứu của Viện Kiến trúc Quốc gia. Internet: https://vienkientrucquocgia.gov.vn/xay-dung-lai-nha-chung-cu-cu-trong-noi-do-ha-noi-bang-co-che-chinh-sach-va-giai-phap-quy-hoach-kien-truc-thich-hop/ (truy cập: tháng 8/2026).

[3] Viện Kiến trúc quốc gia. Cải tạo chung cư cũ trong tái thiết đô thị Hà Nội. Internet: https://vienkientrucquocgia.gov.vn/cai-tao-chung-cu-cu-trong-tai-thiet-do-thi-ha-noi/ (truy cập: tháng 8/2026).

[4] Viện Kiến trúc quốc gia. Cải tạo, xây dựng các chung cư cũ ở Hà Nội dưới góc nhìn xã hội. Internet: https://vienkientrucquocgia.gov.vn/cai-tao-xay-dung-cac-chung-cu-cu-o-ha-noi-duoi-goc-nhin-xa-hoi/ (truy cập: tháng 8/2026).

[5] S. R. Arnstein. A ladder of citizen participation. Journal of the American Institute of planners, vol. 35, no. 4, pp. 216-224, 1969.

[6] P. Healey. Collaborative Planning: Shaping Places in Fragmented Societies. Vancouver, Canada: UBC Press, 1997.

[7] J. E. Innes and D. E. Booher. Collaborative rationality as a strategy for working with wicked problems. Landscape and urban planning, vol. 154, pp. 8-10, 2016.

[8] Nguyễn Thị Phương Thúy. Nghiên cứu sự tham gia của người dân trong các dự án cải tạo chung cư cũ trên địa bàn TP Hà Nội. Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Kinh tế Quốc dân, bảo vệ ngày 04/12/2018.

[9] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15, ngày 26/11/2024.

[10] Quốc hội. Luật số 144/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, ngày 11/12/2025.

[11] Chính phủ. Nghị định số 178/2025/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, ngày 01/7/2025.

[12] Chính phủ. Nghị định số 34/2026/NĐ-CP sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị định số 178/2025/NĐ-CP, ngày 22/01/2026.

[13] Bộ Xây dựng. Thông tư số 16/2025/TT-BXD quy định chi tiết một số điều của Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn, ngày 30/6/2025.

[14] Quốc hội. Luật Nhà ở số 27/2023/QH15, ngày 27/11/2023.

[15] Chính phủ. Nghị định số 98/2024/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Nhà ở về cải tạo, xây dựng lại nhà chung cư, ngày 25/7/2024.

[16] Quốc hội. Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở số 10/2022/QH15, ngày 10/11/2022.

[17] Quốc hội. Luật số 97/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Mặt trận Tổ quốc Việt Nam, Luật Công đoàn, Luật Thanh niên và Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở, ngày 27/6/2025.

[18] Quốc hội. Luật Dữ liệu số 60/2024/QH15, ngày 30/11/2024.

[19] Quốc hội. Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân số 91/2025/QH15, ngày 26/6/2025.

[20] Chính phủ. Nghị định số 356/2025/NĐ-CP quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân, ngày 31/12/2025.

[21] Viện Quy hoạch Xây dựng Hà Nội. Nghiên cứu lập quy hoạch cải tạo chung cư cũ: Nhà nước đóng vai trò chủ đạo. Internet: https://vqh.hanoi.gov.vn/index.php?language=vi&nv=news&op=tin-lien-ket/nghien-cuu-lap-quy-hoach-cai-tao-chung-cu-cu-nha-nuoc-dong-vai-tro-chu-dao-1697.html (truy cập: tháng 8/2026).

■Ngày nhận bài: 21/8/2026 ■Ngày sửa bài: 28/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 07/9/2026

Thực trạng và thách thức của công nghệ mới trong thiết kế và xây dựng kiến trúc nhà ở nông thôn tại Việt Nam

Current status and challenges of new technologies in the design and construction of rural housing architecture in Vietnam

> TS.KTS ĐỖ TRỌNG CHUNG
Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: chungdt@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Sau gần 15 năm xây dựng nông thôn mới, kiến trúc nhà ở nông thôn Việt Nam đã chuyển biến rõ rệt và công nghệ xây dựng hiện đại đang từng bước được áp dụng. Tuy nhiên, việc tiếp cận và ứng dụng các công nghệ này còn nhiều bất cập do các yếu tố kinh tế, văn hóa và kỹ thuật. Trên cơ sở khảo sát thực tế, bài viết phân tích thực trạng ứng dụng công nghệ trong thiết kế và xây dựng nhà ở nông thôn trên phạm vi cả nước và theo sáu vùng kinh tế - xã hội, chỉ ra các thách thức cơ bản, từ đó đề xuất giải pháp nhằm nâng cao hiệu quả và tính bền vững của quá trình này.

Từ khóa: Công nghệ; kiến trúc nông thôn; thiết kế; xây dựng; thông minh.

ABSTRACT

After nearly 15 years of the New Rural Development Program, rural housing architecture in Vietnam has changed markedly and modern construction technologies are gradually being adopted. However, their uptake remains uneven because of economic, cultural and technical constraints. Drawing on field surveys, this article assesses the application of modern technologies in the design and construction of rural housing, nationally and across the six socio-economic regions, identifies the key challenges and proposes recommendations to improve effectiveness and sustainability.

Keywords: Technology; rural architecture; design; construction; smart.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sau bốn mươi năm đổi mới, nông nghiệp - nông dân - nông thôn nước ta đạt nhiều thành tựu, đời sống người dân được cải thiện rõ rệt nên nhu cầu sửa chữa, nâng cấp và xây mới nhà ở nông thôn tăng mạnh. Trong bối cảnh toàn cầu hóa công nghệ và biến đổi khí hậu, ứng dụng công nghệ xây dựng hiện đại vào nhà ở nông thôn là xu hướng tất yếu để nâng cao chất lượng sống, sử dụng hiệu quả tài nguyên và tăng khả năng thích ứng với thiên tai. Tuy nhiên, ở sáu vùng kinh tế nông thôn, quá trình này đang đối mặt với nhiều khó khăn. Vì vậy, cần nghiên cứu toàn diện thực trạng và thách thức để đề xuất giải pháp khả thi cho phát triển bền vững kiến trúc nhà ở nông thôn. Bài viết sử dụng số liệu, hình ảnh khảo sát thực tế của tác giả (điển hình tại Vĩnh Phúc, 2023 - 2024), kết hợp phân tích các văn bản chính sách và tài liệu liên quan.

2. TỔNG QUAN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG HIỆN ĐẠI TRONG KIẾN TRÚC NHÀ Ở NÔNG THÔN

Theo Từ điển Bách khoa (hoặc theo lý thuyết quản lý công nghệ), công nghệ được cấu thành bởi bốn yếu tố cơ bản: kỹ thuật (máy móc, thiết bị), nhân lực, thông tin và tổ chức triển khai [1]. Bài viết dựa trên khung lý thuyết này để phân tích thực trạng tại mục 4.1.

Ở nhiều vùng nông thôn, ứng dụng công nghệ trong thiết kế và xây dựng đang phát triển khá tích cực nhưng còn tự phát, thiếu đồng bộ. Về kỹ thuật, các công cụ hiện đại như AutoCAD, Revit, BIM, in 3D… mới manh nha, chưa phổ biến ở cấp nhà tư vấn hay nhà thầu nông thôn. Về nhân lực, lực lượng có trình độ công nghệ tập trung chủ yếu ở đô thị, trong khi thợ thi công nông thôn phần lớn là thợ truyền thống, ít được đào tạo bài bản. Về thông tin và hạ tầng, vùng ven đô, ven khu công nghiệp tiếp cận công nghệ tốt hơn miền núi, vùng sâu, vùng xa; hạ tầng mạng, điện và dữ liệu số hóa tuy cải thiện nhanh vẫn ở mức khiêm tốn. Tuy nhiên, xu hướng chuyển đổi đang hình thành: một số dự án nông thôn mới, nhà ở kiểu mẫu đã bước đầu ứng dụng BIM, thiết kế 3D, IoT trong thiết kế, thi công và giám sát dưới sự hỗ trợ từ các startup, trường đại học và viện nghiên cứu [11].

Về tổ chức và chính sách, bốn nhóm rào cản chính được nhận diện: (i) chi phí đầu tư ban đầu (phần mềm bản quyền, thiết bị đo đạc, in 3D, vật liệu mới) quá cao so với khả năng của người dân; (ii) thiếu quy chuẩn công nghệ riêng cho nông thôn, dẫn đến việc áp dụng công nghệ đô thị thiếu phù hợp; (iii) thiếu công tác đào tạo, phổ cập tại chỗ, cộng với tâm lý e ngại thay đổi, chuộng thói quen tự thiết kế - tự xây theo kinh nghiệm "cha truyền con nối"; (iv)

chính sách chuyển đổi số chủ yếu hướng vào nông nghiệp, thương mại, chưa cụ thể hóa cho lĩnh vực thiết kế, xây dựng và kiến trúc nông thôn.

3. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ

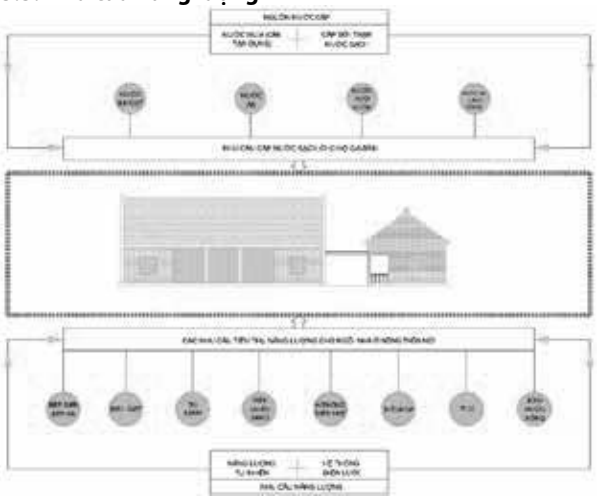
3.1. Công nghệ số

Tiến trình chuyển đổi số quốc gia đã làm cho công nghệ số trở thành nhân tố tác động ngày càng mạnh mẽ đến mọi giai đoạn của ngành xây dựng nông thôn. *Về thiết kế,* tính toán thủ công đang được thay dần bằng BIM - mô hình 3D hỗ trợ kiểm soát chi phí, vật liệu, tiến độ từ thiết kế đến thi công; CAD, Revit, SketchUp cho phép mô phỏng không gian nhanh và thử nhiều phương án; dữ liệu số và GIS giúp phân tích địa hình, thủy văn, khí hậu để tối ưu hóa thiết kế theo đặc thù từng địa phương. *Về thi công,* máy thông minh, robot tuy còn ít phổ biến nhưng đã xuất hiện trong các dự án thí điểm; công nghệ in 3D bê tông mở ra tiềm năng cho nhà giá rẻ, xây nhanh ở vùng khó khăn; drone hỗ trợ khảo sát và giám sát từ xa. *Về vận hành,* hệ thống điều khiển thông minh cho chiếu sáng, cấp thoát nước, tưới tiêu cùng công nghệ IoT giám sát môi trường (không khí, nhiệt độ, độ ẩm) đang góp phần chuyển đổi làng truyền thống sang mô hình làng thông minh. Song, thách thức đặt ra vẫn rất lớn: hạ tầng mạng và điện chưa đồng bộ; trình độ tiếp nhận của lực lượng lao động còn hạn chế; chi phí đầu tư ban đầu cao; cùng nguy cơ lệ thuộc công nghệ ngoại nhập hay làm mai một bản sắc bản địa nếu không được triển khai thận trọng.

3.2. Tiến bộ của khoa học vật liệu

Vật liệu mới tạo bước ngoặt về hiệu quả thi công, tính bền vững và công năng, nhất là trong ứng phó biến đổi khí hậu. *Vật liệu xanh* (gạch không nung, bê tông geopolymer, vật liệu tái chế từ tro bay, xỉ lò, rơm rạ; cách nhiệt sinh học từ tre, dừa, rơm ép; sơn sinh học không VOC) giảm phát thải CO_2 và chi phí điều hòa. *Vật liệu thông minh* gồm kính điều chỉnh sáng - tối, bê tông tự phục hồi vết nứt nhỏ, vật liệu chuyển pha (PCM) điều hòa vi khí hậu. *Vật liệu tiên tiến* như bê tông siêu tính năng UHPC (cường độ gấp 4-6 lần bê tông thường), panel cách nhiệt, tấm sàn xi măng sợi cellulose và cấu kiện đúc sẵn kết hợp công nghệ số, in 3D giúp giảm tải trọng, tăng tốc độ thi công, giảm lãng phí. Với nông thôn, hướng đi hợp lý là cải tiến vật liệu địa phương (gạch đất nén, tre ép, đá ong, ngói đất nung) và kết hợp với công nghệ mới, vừa giữ bản sắc, vừa tạo được nhà ở xanh, tiết kiệm và công trình công cộng (nhà văn hóa, trạm y tế, trường học) bền vững với chi phí hợp lý [8].

3.3. Nhu cầu năng lượng



Hình 1. Nhu cầu năng lượng và nước sạch của ngôi nhà ở nông thôn hiện nay

Nhu cầu năng lượng gắn với cả giai đoạn xây dựng (khai thác, vận chuyển, chế biến vật liệu như nung gạch, sản xuất bê tông; thi công cơ giới; chiếu sáng công trường) và vận hành (chiếu sáng, thông gió, điều hòa, bơm nước, nấu ăn, sưởi ấm, sản xuất hộ gia đình như xưởng mộc, xay xát) (Hình 1). Thách thức gồm: hạ tầng điện hạn chế, nhiều nơi chưa ổn định; còn phụ thuộc củi, than, dầu diesel; tiêu chuẩn thiết kế tiết kiệm năng lượng chưa phổ biến; khí hậu vùng miền chi phối nhu cầu (miền Bắc cần sưởi mùa đông, miền Trung - Nam cần làm mát mùa hè). Cần ưu tiên năng lượng mặt trời, gió, biogas từ chất thải nông nghiệp; thiết kế tận dụng ánh sáng, thông gió tự nhiên và vật liệu cách nhiệt; phát triển công trình xanh, thích ứng khí hậu và tăng cường đào tạo, tuyên truyền sử dụng năng lượng hiệu quả. Năng lượng vì thế không chỉ là vấn đề kỹ thuật mà còn là thách thức phát triển bền vững.

3.4. Nhu cầu sử dụng công nghệ và trang thiết bị mới của cư dân

Đời sống được nâng cao khiến thiết bị công nghệ vào nhà ở nông thôn ngày càng nhiều [2]: thiết bị sinh hoạt (TV thông minh, máy giặt, tủ lạnh, máy lọc nước, năng lượng mặt trời), smartphone, camera an ninh, thanh toán điện tử và thương mại điện tử (Zalo, MoMo, Shopee, TikTok…) ở lớp trẻ; thiết bị sản xuất nông nghiệp (máy gặt liên hợp, tưới tự động, drone phun thuốc, cảm biến IoT đo độ ẩm, nhiệt độ, pH đất, nhật ký số, truy xuất nguồn gốc); máy tính, internet phục vụ học trực tuyến; thiết bị y tế (đo huyết áp, đường huyết, theo dõi và tư vấn sức khỏe từ xa). Nhu cầu tăng mạnh nhất ở vùng gần đô thị, hạ tầng tốt, nhưng vấp phải hạ tầng viễn thông yếu, trình độ số hạn chế, giá thiết bị cao so với thu nhập và thiếu đội ngũ sửa chữa tại chỗ. Các nhu cầu này cần được đưa vào giải pháp thiết kế, thi công (không gian cho thiết bị, pin mặt trời, chỗ để xe cơ giới…).

3.5. Tác động của chính sách

Chủ trương của Đảng và Nhà nước tạo động lực rõ rệt: Nghị quyết 52-NQ/TW (2019) thúc đẩy IoT, AI, BIM, vật liệu mới trong xây dựng [3]; Quyết định 749/QĐ-TTg (2020) về Chương trình Chuyển đổi số quốc gia ưu tiên hạ tầng số, công nghệ số trong mọi lĩnh vực, kể cả nông thôn và xây dựng [4]; Chương trình mục tiêu quốc gia xây dựng nông thôn mới từ 2010 đặt ra tiêu chí ngày càng cao về hạ tầng, nhà ở, vật liệu và tính bền vững [7]; Thông tư 01/2022/TT-BXD hướng dẫn hỗ trợ nhà ở cho hộ nghèo, cận nghèo theo hướng kiên cố, bền vững, khuyến khích nhà tiết kiệm năng lượng, kiến trúc xanh, thích ứng khí hậu [5]; Luật Xây dựng sửa đổi 2020 và Quyết định 258/QĐ-TTg (2023) tạo hành lang pháp lý cho BIM, GIS, AI, VR; Luật Di sản văn hóa và Luật Kiến trúc yêu cầu bảo tồn bản sắc đồng thời khuyến khích tích hợp giải pháp công nghệ phù hợp; ngân sách Trung ương và địa phương hỗ trợ hạ tầng kỹ thuật (điện thông minh, thoát nước, chiếu sáng) và nhà ở cho người thu nhập thấp kèm hướng dẫn kỹ thuật xây dựng giá rẻ, bền vững. Hệ thống chính sách vì vậy định hướng rõ về phát triển bền vững, chuyển đổi số và gìn giữ bản sắc, góp phần thay đổi bộ mặt nông thôn; song như đã nêu ở mục 2, chính sách chưa được cụ thể hóa cho thiết kế, xây dựng kiến trúc nông thôn.

4. NHẬN DIỆN THỰC TRẠNG VÀ THÁCH THỨC

4.1. Thực trạng và thách thức chung

4.1.1. Kỹ thuật - thiết bị, máy móc

Mức độ ứng dụng chênh lệch lớn giữa các khu vực, trình độ chuyên môn và nguồn lực kinh tế. *Khảo sát, thiết kế*: máy toàn đạc điện tử, GPS, flycam, khoan địa chất chủ yếu dùng ở dự án công cộng, trụ sở (trường học, UBND xã); đa số nhà dân đo đạc thủ công, không khảo sát địa chất, bản vẽ sơ sài hoặc xây theo mẫu có sẵn; AutoCAD, SketchUp ít dùng do thiếu nhân lực và máy tính phù

hợp. *Thi công*: cơ giới hóa còn thấp (Hình 2); máy trộn, khoan cắt, máy nâng chỉ có ở công trình lớn vốn nhà nước, nhà dân chủ yếu lao động thủ công, ít nhà lắp ghép, vật liệu nhẹ, máy đo chính xác. Một số địa phương ven đô, đồng bằng đã tiếp cận vật liệu mới (gạch không nung, mái tôn cách nhiệt, bê tông nhẹ) nhưng vẫn thi công theo phương pháp cũ nên hiệu quả giảm. Máy phổ biến là máy trộn bê tông mini, đầm dùi/bàn/cóc, máy cắt, uốn sắt cỡ nhỏ, khoan, hàn; xe cẩu nhỏ, xe ben, máy xúc mini chỉ có ở vùng đồng bằng, ven đô. *Vận hành, giám sát*: thiết bị giám sát chất lượng, bảo trì gần như chưa phổ biến; đèn cảm biến, điện mặt trời, tưới tự động chủ yếu ở mô hình thí điểm hoặc hộ khá giả; không có hệ thống giám sát kết cấu, cảnh báo hư hỏng, theo dõi khí hậu, trừ công trình đặc biệt. Thách thức: thiếu thiết bị và nhân lực kỹ thuật tại chỗ; chi phí đầu tư cao; hạ tầng yếu (điện không ổn định, đường vận chuyển kém); chuyển giao thiết bị còn manh mún, thiếu hệ thống.

Hình 2. Thi công nhà ở nông thôn hiện nay cơ bản vẫn dùng công cụ thủ công: xe đẩy nhỏ, máy trộn bê tông thủ công, máy cắt - mài thủ công, tốp thợ làng, đổ mái nhà 3 tầng và lát nền thủ công (Ảnh: Tác giả khảo sát tại Vĩnh Phúc, 2023 - 2024)

4.1.2. Nhân lực

Con người là trung tâm từ ý tưởng, thiết kế, tổ chức thi công đến vận hành; nhà ở nông thôn gắn với sinh kế, văn hóa, tập quán nên vai trò của nhân lực địa phương và chuyên môn kiến trúc càng quan trọng. *Cán bộ kỹ thuật, thiết kế* thiếu về số lượng và chất lượng, nhất là vùng sâu, vùng xa; công trình nhỏ lẻ phần lớn không có thiết kế chuyên nghiệp. KTS trẻ ở lại thành phố do thiếu môi trường sáng tạo và thu nhập thấp: theo điều tra các khóa ra trường 2010 - 2015, trên 80% làm việc tại các đô thị lớn [6]. *Lao động thi công* chủ yếu là lao động phổ thông, học nghề truyền tay, thiếu kỹ năng sử dụng thiết bị, vật liệu hiện đại và kiến thức an toàn; tổ chức thi công theo kinh nghiệm hơn là quy trình chuẩn; tư tưởng lao động mùa vụ, ngắn hạn. *Cán bộ quản lý địa phương* thiếu kiến thức chuyên môn để kiểm tra, tư vấn, hướng dẫn người dân; thiếu cơ chế phối hợp chính quyền - nhà chuyên môn - cộng đồng. Việc sáp nhập đơn vị hành chính (01/7/2025) dồn cán bộ trình độ tốt hơn về cấp xã, phường được kỳ vọng sẽ cải thiện hạn chế này. Tựu trung, thách thức gồm: thiếu hụt nhân lực chuyên môn; chất lượng chưa đáp ứng; tư duy nghề nghiệp lạc hậu; khó khăn trong quản lý, phối hợp; thiếu cơ chế thu hút, giữ chân nhân tài; đào tạo chưa gắn với thực tiễn nông thôn.

4.1.3. Thông tin

Nhiều vùng nông thôn chưa có cơ sở dữ liệu chính thức về quy hoạch, bản đồ địa hình, khí hậu, địa chất, vật liệu địa phương; thông tin phân mảnh, không cập nhật (việc chia tách, sáp nhập địa giới càng gây khó); mẫu thiết kế theo vùng rất ít và có thể không còn phù hợp. Xây dựng chủ yếu dựa vào kinh nghiệm truyền miệng của thợ địa phương, thiếu tài liệu hướng dẫn bài bản, gây khó cho áp dụng công nghệ mới và bảo đảm an toàn công trình (Bảng 1). Trong khi đó, dữ liệu kỹ thuật cung cấp thông số chuẩn hóa (kết cấu, vật liệu, thông gió, chiếu sáng, kháng thiên tai) là nền tảng đào tạo, phổ biến kiến thức cho cán bộ cơ sở, người dân, thợ; sổ tay xây dựng giúp xây phù hợp khí hậu, định hướng kiến trúc bản sắc, tránh lai căng hay rập khuôn đô thị; kinh nghiệm của cộng đồng, thợ lành nghề, nghệ nhân là tri thức quý cần kết hợp với công nghệ và bảo tồn.

Bảng 1. Thực trạng sử dụng các loại dữ liệu trong thiết kế và xây dựng kiến trúc nông thôn

Loại dữ liệu	Thực trạng sử dụng thực tế
Khí hậu địa phương (nắng, mưa, gió)	Ít được tích hợp vào thiết kế (dù trước đây rất được chú trọng trong xây dựng truyền thống); rất ít phân tích chiếu sáng, thông gió.
Địa hình, địa chất	Chủ yếu khảo sát bằng tay hoặc đo đơn giản; chưa khai thác dữ liệu số, dữ liệu sẵn có.
Tập quán, mô hình sinh hoạt	Có tính đến nhưng mang tính cảm tính, không có cơ sở dữ liệu rõ ràng.
Quy hoạch xây dựng	Một số khu vực áp dụng đúng (công trình công cộng); đại đa số nhà dân vẫn xây tùy tiện.
Giá vật liệu, nguồn nhân lực	Có tính đến nhưng không hệ thống hóa; tùy thời điểm và địa phương, thiếu thống nhất.

Thách thức: thiếu nền tảng số tích hợp dữ liệu; cán bộ, thợ xây thiếu kỹ năng truy cập và sử dụng thông tin kỹ thuật; đứt gãy giữa kinh nghiệm truyền thống và công nghệ hiện đại. Giai đoạn tới cần xây dựng thư viện số dữ liệu kỹ thuật và mẫu thiết kế, biên soạn sổ tay xây dựng cho từng vùng miền, thiết lập nền tảng kết nối KTS - kỹ sư - thợ truyền thống và tổ chức tập huấn, hội thảo cho cộng đồng xây dựng địa phương.

4.1.4. Tổ chức

Quản lý nhà nước còn phân tán, phân cấp Trung ương - địa phương chồng chéo; vai trò của chính quyền xã, huyện (trước ngày 01/7/2025) trong quy hoạch, giám sát hạn chế; phối hợp giữa các sở, ngành (Xây dựng, Nông nghiệp, Văn hóa…) thiếu chặt chẽ. Biểu hiện cụ thể: (i) thiếu đơn vị chuyên trách hoặc tổ chức trung gian tư vấn thiết kế, thi công, người dân phần lớn tự xây theo kinh nghiệm; ở đồng bằng, ven đô đã manh nha có bản vẽ nhưng chủ yếu sơ bộ vì kinh phí eo hẹp; (ii) thiếu kết nối giữa chính quyền, KTS, kỹ sư, nhà thầu và người dân nên công trình chưa đạt hiệu quả về chức năng, thẩm mỹ, kiến trúc lộn xộn, thiếu thống nhất kiểu cách; (iii) giám sát chất lượng, quản lý quy hoạch mang tính hình thức, người dân ít được tham gia đánh giá, phản hồi. Thách thức: thiếu lực lượng chuyên môn cấp cơ sở (nhiều nơi không có phòng kỹ thuật hạ tầng hay tổ quy hoạch – kiến trúc); thiếu quy trình phối hợp chuẩn nên dễ xung đột lợi ích, nhất là ở công trình cộng đồng; ngân sách hạn chế, giải ngân phức tạp, thiếu minh bạch với vốn nhà nước; xem nhẹ vai trò cộng đồng, tâm lý "nhanh - rẻ - tiện".

4.2. Thực trạng và thách thức theo sáu vùng kinh tế - xã hội

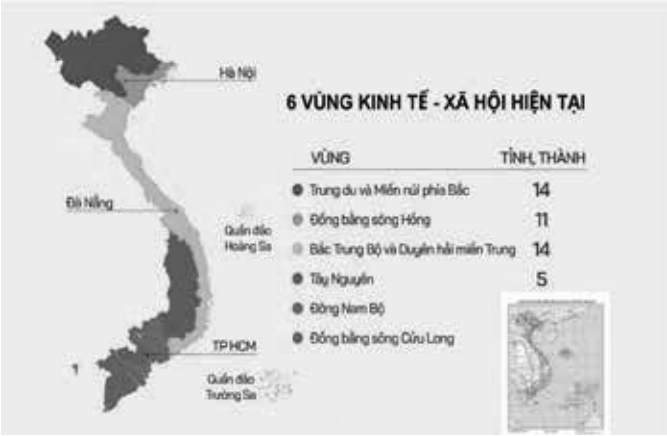
Các địa danh dưới đây theo cấu trúc 34 tỉnh, thành sau sáp nhập từ ngày 01/7/2025 (bản đồ sáu vùng chưa được cập nhật tại thời điểm nghiên cứu).

Khái quát. Phân tích sáu vùng dưới đây cho thấy: công trình công cộng và dự án điểm được ứng dụng công nghệ nhiều hơn nhà ở dân; vùng ven đô, đồng bằng, kinh tế phát triển vượt trội vùng sâu, vùng xa, miền núi; mỗi vùng có thách thức đặc thù (địa hình hiểm trở ở miền núi phía Bắc, mật độ dày ở Đồng bằng sông Hồng (ĐBSH), thiên tai ở miền Trung, đô thị hóa và mất bản sắc ở Đông Nam Bộ, nước biển dâng ở Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), trong khi nhân lực, tài chính và nhận thức là các rào cản xuyên suốt.

4.2.1. Trung du và miền núi phía Bắc

Gồm Tuyên Quang, Cao Bằng, Lai Châu, Điện Biên, Lạng Sơn, Sơn La, Lào Cai, Thái Nguyên và Phú Thọ (nay gồm cả Vĩnh Phúc cũ, trước thuộc ĐBSH, có điều kiện tốt hơn hẳn). Kiến trúc truyền thống gắn với tập quán dân tộc (nhà sàn, nhà đất nện), dân cư

phân tán, mật độ xây dựng thấp, phụ thuộc điều kiện tự nhiên. *Thực trạng*: thiết kế chủ yếu thủ công hoặc tái sử dụng mẫu cũ; CAD mới bắt đầu, rất ít BIM hay mô phỏng môi trường (khảo sát tại Vĩnh Phúc cho thấy gia chủ chỉ thuê bản vẽ kiến trúc cơ bản vì kinh phí hạn hẹp, kết hợp AutoCAD với phác thảo tay và thi công thủ công); thi công chỉ có máy nhỏ (trộn, đầm, khoan cầm tay), thiếu cơ giới hạng nặng; vật liệu chủ yếu tận dụng tại chỗ (đá, gỗ, đất nện); thông tin kỹ thuật chia sẻ chủ yếu truyền miệng; rất ít KTS, kỹ sư sống lâu dài tại vùng. *Thách thức*: địa hình hiểm trở cản trở vận chuyển thiết bị, sạt lở, lũ ống, lũ quét gián đoạn thi công và đòi hỏi thiết kế thích ứng; internet yếu, thiếu thiết bị và kỹ năng số hóa bản vẽ; thu nhập thấp, chi phí công nghệ không phù hợp quy mô hộ; thiếu tư vấn am hiểu cả công nghệ và văn hóa bản địa, thợ chưa tiếp cận bê tông nhẹ, mô-đun, cấu kiện lắp ghép; tập quán xây dựng truyền thống, đòi hỏi tôn trọng bản sắc (không gian cộng đồng, nhà sàn, hướng nhà).



Hình 3. Bản đồ sáu vùng kinh tế - xã hội theo địa giới hành chính trước ngày 01/7/2025 (Nguồn: Bản đồ trực tuyến; dữ liệu chưa cập nhật tại thời điểm nghiên cứu)

4.2.2. Đồng bằng sông Hồng

Gồm Hà Nội, Hải Phòng, Quảng Ninh, Bắc Ninh, Hưng Yên, Ninh Bình. Vùng có kiến trúc nông thôn phát triển nhất cả nước, đang chuyển từ thuần nông sang đa chức năng (ở, sản xuất công - nông nghiệp, dịch vụ, du lịch), song ứng dụng công nghệ vẫn hạn chế [10]. *Thiết kế*: AutoCAD, SketchUp, Revit khá phổ biến ở cơ quan tư vấn nhưng chủ yếu cho công trình công cộng; nhà dân có thiết kế bài bản thì dùng bản vẽ máy tính, còn lại tự phát hoặc sao chép mẫu không phù hợp lô đất; BIM tích hợp thiết kế - dự toán - quản lý thi công mới ở một số dự án điểm (Bảng 2). Nguyên nhân: cán bộ cấp xã chưa được đào tạo về thiết kế số, thợ địa phương không quen bản vẽ chi tiết, người dân ưu tiên giá rẻ và không muốn trả phí thiết kế, thiếu cơ sở dữ liệu quy hoạch, bản đồ số. *Thi công*: máy nhỏ (trộn bê tông, cắt gạch, xe cẩu nhỏ) khá phổ biến, nhưng mật độ dân cư cao, đất chia nhỏ, nhà san sát, đường thôn xóm hẹp khiến khó áp dụng thi công cơ giới lớn hay nhà tiết kiệm năng lượng đúng chuẩn. Vật liệu hiện đại (gạch không nung, bê tông trộn sẵn, ngói cách nhiệt, sơn chống nóng) mới có ở công trình mẫu, xã nông thôn mới nâng cao, ven đô; điện mặt trời áp mái ở một số trang trại, nhà văn hóa; chiếu sáng, cảm biến, quản lý nước thông minh rất hạn chế. *Thách thức*: nhà ống, nhà cơi nới lộn xộn phá vỡ tổng thể làng truyền thống, gây mâu thuẫn bảo tồn - hiện đại hóa; thiếu nhân lực kỹ thuật tại chỗ; chi phí đầu tư lớn; quy định về BIM, vật liệu xanh, tiết kiệm năng lượng chưa cụ thể cho nông thôn; tâm lý "làm như cũ", "xây chắc là được" và thiếu truyền thông trực quan về lợi ích công nghệ. Vượt qua các rào cản này đòi hỏi phối hợp nhà nước - nhà khoa học - doanh nghiệp - cộng đồng và nhân rộng mô hình mẫu có sức lan tỏa.

Bảng 2. Mức độ sử dụng công nghệ thiết kế và công cụ trao đổi tại vùng ĐBSH

Công nghệ	Mức độ sử dụng hiện nay
AutoCAD (bản vẽ 2D)	Phổ biến ở công trình công; đã dùng ở nhà dân nhưng chưa phổ biến.
SketchUp (dựng hình 3D)	Trung bình, chủ yếu nhóm KTS trẻ; ít dùng trong thiết kế nhà dân.
Revit / BIM	Rất ít; mới thử nghiệm ở dự án kiểu mẫu hoặc do tư vấn đô thị triển khai.
Lumion / Enscape (diễn họa)	Thấp; chủ yếu trình bày ý tưởng ở thiết kế mẫu, dự án lớn.
Thiết kế từ xa (Zalo, Zoom, email)	Tăng nhanh, nhất là sau COVID, do thiết lập và sử dụng đơn giản.
Thực tế ảo (VR) / tăng cường (AR)	Gần như chưa áp dụng.

4.2.3. Bắc Trung Bộ, Duyên hải miền Trung và Tây Nguyên

Sau sáp nhập gồm Thanh Hóa, Nghệ An, Hà Tĩnh, Quảng Trị, Huế, Đà Nẵng, Quảng Ngãi, Gia Lai, Đắk Lắk, Khánh Hòa, Lâm Đồng. Địa hình chia cắt, đồng bằng hẹp, khí hậu khắc nghiệt, thiên tai thường xuyên (bão, lũ, hạn hán), đô thị hóa thấp hơn ĐBSH và Đông Nam Bộ; nhu cầu xây dựng tăng mạnh nhưng công nghệ chưa theo kịp. *Thực trạng*: CAD/BIM khá phổ biến ở đơn vị tư vấn, nhưng BIM, mô phỏng khí hậu, kết cấu còn hạn chế; SketchUp, Revit chủ yếu do công ty thành phố thực hiện ở dự án điểm, còn cấp xã gần như không có (máy in khổ lớn, máy chiếu, máy scan 3D vắng bóng); khảo sát địa hình nhà dân vẫn thủ công, ít dùng drone, toàn đạc điện tử. Thi công dùng máy trộn, cắt sắt, cắt gạch, đầm cóc nhỏ và thủ công; máy ép cọc, khoan địa chất, xe nâng, cần cẩu mini hầu như chỉ có ở công trình lớn do tỉnh, thành quản lý. Điện mặt trời áp mái, xử lý nước thải theo cụm mới ở mức thí điểm; cảm biến độ ẩm, cảnh báo lũ, mô hình nhà chống bão, lũ quét chủ yếu nằm trong dự án của tổ chức phi chính phủ hoặc viện nghiên cứu; smart home gần như chưa có. KTS, kỹ sư tập trung ở Vinh, Huế, Đà Nẵng; tỷ lệ KTS, kỹ sư ở nông thôn thấp hơn miền Bắc và miền Nam; các trường chưa có chương trình chuyên sâu về kiến trúc nông thôn. *Thách thức*: đường hẹp, thời tiết khắc nghiệt gây hư hỏng thiết bị, gián đoạn thi công; theo báo cáo của Bộ Xây dựng (2022), 95% đội thợ xây dựng nông thôn Việt Nam làm việc không qua hệ thống kiểm định, đào tạo lại; thiết bị đắt nhưng nhu cầu nhỏ lẻ, thiếu mô hình thiết bị dùng chung và hệ thống bảo trì tại chỗ; thiếu vay ưu đãi, tiêu chí nông thôn mới chưa đề cao kiến trúc và công nghệ; tập quán tin vào kinh nghiệm thủ công, thiếu minh chứng thực tiễn về hiệu quả công nghệ.

4.2.4. Đông Nam Bộ

Sau sáp nhập gồm TP.HCM, Đồng Nai, Tây Ninh. Vùng công nghiệp hóa, đô thị hóa cao, hạ tầng khá phát triển; kiến trúc nông thôn đa dạng, vật liệu và nội thất ngày càng hiện đại [9], nhưng thiếu bản sắc, thiếu thống nhất về hình thể, lộn xộn về ngôn ngữ, chênh lệch lớn giữa ven đô và vùng xa. *Thực trạng*: CAD, Revit, SketchUp được tiếp cận ở hầu hết địa phương cho công trình nông thôn, song hộ dân và đơn vị nhỏ vẫn dùng bản vẽ tay hoặc mẫu nhà có sẵn, không phù hợp từng lô đất; máy móc khá hiện đại (trộn bê tông, lu - đầm, cẩu, xe nâng) chủ yếu ở cận đô thị, vùng sâu vẫn thủ công; dữ liệu quy hoạch, bản đồ địa chính, mô hình 3D nông thôn đang dần số hóa, thông tin trực tuyến phong phú; vật liệu công nghiệp mới (panel, vật liệu nhẹ, vật liệu xanh) phát triển rộng do chi phí chấp nhận được. *Thách thức*: KTS, kỹ sư tập trung ở TP.HCM, Bình Dương, Đồng Nai, thiếu kỹ sư BIM, chuyên gia GIS; vùng ven đô (Củ Chi, Long Thành) tiếp cận công nghệ tốt hơn

vùng sâu (Lộc Ninh, Tân Châu), chi phí bản vẽ 3D, BIM, vật liệu mới khó đáp ứng, thiếu chính sách cụ thể, dài hạn; thiếu dữ liệu không gian, nền tảng mở và hệ thống dùng chung giữa chính quyền - người dân - chuyên gia; đô thị hóa nhanh, công nghệ và vật liệu mới được áp dụng thiếu chọn lọc làm mai một nhà ba gian, nhà sàn, nhà vườn Nam Bộ, mẫu hóa rập khuôn đô thị.

4.2.5. Đồng bằng sông Cửu Long

Bảng 3. Các nhóm thách thức ứng dụng công nghệ trong thiết kế và xây dựng kiến trúc nông thôn vùng ĐBSCL

Nhóm thách thức	Mô tả cụ thể
1. Hạ tầng số và công nghệ	Internet không ổn định, thiết bị công nghệ đắt đỏ, khó tiếp cận với người dân và đơn vị thiết kế - thi công ở vùng xa, ven biển, vùng sông nước khó tiếp cận cơ giới.
2. Nhân lực kỹ thuật	Thiếu KTS, kỹ sư tại chỗ am hiểu công nghệ; lao động địa phương thiếu đào tạo bài bản, tay nghề non, mang tính chất thợ vườn.
3. Cơ chế chính sách hỗ trợ	Thiếu chính sách hỗ trợ ứng dụng công nghệ; chưa có gói hỗ trợ kỹ thuật, tài chính, tiêu chuẩn kỹ thuật rõ ràng cho cư dân nông thôn.
4. Đặc thù địa hình, khí hậu	Ngập mặn, lũ lụt, nước biển dâng, nền đất yếu khiến công nghệ truyền thống kém hiệu quả, trong khi công nghệ tiên tiến chưa thích ứng tốt với bối cảnh sông nước chia cắt.
5. Tập quán và nhận thức cộng đồng	Ưa chuộng mô hình xây dựng cũ, đơn giản, tạm bợ (nhà vách tường đơn sơ, mái lá dừa nước, kết cấu cây đước); ít tiếp cận thiết kế công nghệ, công trình xanh, bền vững.

Sau sáp nhập gồm TP Cần Thơ, Vĩnh Long, Đồng Tháp, An Giang, Cà Mau (trước đây 13 tỉnh, thành). Là vùng trọng điểm nông nghiệp, sông ngòi dày, chịu tác động mạnh của biến đổi khí hậu, nước biển dâng, ngập lụt, xâm nhập mặn; dân cư phân bố rải rác theo sông, kênh rạch nên chi phí hạ tầng lớn. *Thực trạng*: AutoCAD, SketchUp, Revit, Lumion chủ yếu ở đô thị lớn (Cần Thơ, Long Xuyên), nông thôn thiết kế theo kinh nghiệm hoặc mẫu truyền thống; khảo sát địa hình thủ công, GIS, flycam chưa phổ biến; nhà nổi, nhà chống lũ mới thử nghiệm; máy đào, đầm rung chỉ có ở nhà thầu lớn; vật liệu truyền thống (gạch, bê tông, tôn kẽm) chiếm ưu thế, công nghệ mô-đun, lắp ghép chưa phổ biến do chi phí cao, thiếu nhân lực vận hành; giám sát thi công mang tính truyền thống, nhà dân do gia chủ tự quyết. *Thách thức* tập trung ở năm nhóm (Bảng 3), cùng với việc thiếu mô hình mẫu và cơ chế chuyển giao công nghệ phù hợp, khiến thông tin và hướng dẫn kỹ thuật chưa đến được cộng đồng xây dựng và người dân vùng xa, ven biển.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Bài viết đã phân tích các yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến ứng dụng công nghệ trong thiết kế và xây dựng kiến trúc nông thôn Việt Nam. Thực trạng cho thấy đã có những bước tiến ở thiết kế 3D, mô phỏng, cơ giới hóa thi công và sử dụng vật liệu mới, nhưng mức độ áp dụng chưa đồng đều giữa các vùng, phụ thuộc điều kiện kinh tế - xã hội, hạ tầng kỹ thuật, địa hình và trình độ nhân lực. Năm thách thức chính là: (1) thiếu KTS, kỹ sư, công nhân am hiểu và vận hành thành thạo công nghệ mới; (2) hạ tầng điện, internet, giao thông chưa đáp ứng yêu cầu; (3) chi phí đầu tư ban đầu cao, khó tiếp cận vốn, thiếu cơ chế hỗ trợ tài chính; (4) khoảng cách thông tin và chuyển giao công nghệ, thiếu mô hình mẫu, hướng dẫn cụ thể; (5) công nghệ chưa được điều chỉnh phù hợp với khí hậu, văn hóa và nhu cầu từng vùng. Nếu giải quyết được, công nghệ sẽ nâng cao chất lượng công trình, tiết kiệm tài nguyên, bảo tồn bản sắc kiến trúc, thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội và cải thiện đời sống người dân nông thôn.

5.2. Kiến nghị

Thể chế, chính sách: Xây dựng bộ tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật cho kiến trúc nông thôn ứng dụng công nghệ, gắn với chương trình nông thôn mới nâng cao; ưu đãi tín dụng, hỗ trợ vốn vay, miễn giảm thuế cho dự án ứng dụng công nghệ mới; tạo hành lang pháp lý cho thử nghiệm mô hình công nghệ và khuyến khích xã hội hóa đầu tư.

Nhân lực: Đào tạo, tập huấn định kỳ về công nghệ xây dựng mới cho cán bộ kỹ thuật, KTS, kỹ sư và đặc biệt là thợ xây địa phương; đẩy mạnh hợp tác giữa trường đại học, viện nghiên cứu và chính quyền địa phương để chuyển giao công nghệ phù hợp.

Hạ tầng và nguồn lực: Nâng cấp hạ tầng điện, internet, giao thông đáp ứng yêu cầu của công nghệ xây dựng và thiết kế số; xây dựng trung tâm dịch vụ công nghệ cộng đồng cung cấp thiết bị, tư vấn và chia sẻ kinh nghiệm triển khai.

Nghiên cứu và phát triển: Tập trung giải pháp công nghệ đơn giản, chi phí hợp lý, dễ bảo trì, phù hợp khí hậu và tập quán từng vùng; kết hợp công nghệ hiện đại với vật liệu, kỹ thuật truyền thống để vừa nâng cao hiệu quả xây dựng, vừa bảo tồn giá trị văn hóa và kiến trúc địa phương.

Lời cảm ơn: Tác giả trân trọng cảm ơn Hội Kiến trúc sư Việt Nam đã tài trợ nghiên cứu này trong Chương trình khoa học cấp nhà nước "Kiến trúc nông thôn từ truyền thống đến hiện đại, gắn kết thời kỳ hội nhập".

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hội đồng Quốc gia chỉ đạo biên soạn Từ điển Bách khoa Việt Nam, Hà Nội, 2005.

[2] Đỗ Trọng Chung. Giải pháp cải tạo và nâng cấp nhà ở nông thôn giai đoạn 1945 - 1986 phù hợp xu thế mới tại vùng Đồng bằng sông Hồng. Tạp chí Kiến trúc Việt Nam, Viện Kiến trúc Quốc gia, số 244, 2023.

[3] Ban Chấp hành Trung ương Đảng. Nghị quyết số 52-NQ/TW ngày 27/9/2019 về một số chủ trương, chính sách chủ động tham gia cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư, Hà Nội, 2019.

[4] 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", Hà Nội, 2020.

[5] Bộ Xây dựng. Thông tư số 01/2022/TT-BXD ngày 30/6/2022 hướng dẫn thực hiện hỗ trợ nhà ở cho hộ nghèo, hộ cận nghèo trên địa bàn các huyện nghèo giai đoạn 2021 – 2025, Hà Nội, 2022.

[6] Đỗ Trọng Chung. Tổ chức môi trường ở nông thôn vùng đồng bằng sông Hồng theo hướng hiện đại và phát huy giá trị truyền thống. Luận án Tiến sĩ Kiến trúc, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2016.

[7] Chính phủ. Quyết định số 800/QĐ-TTg ngày 04/6/2010 phê duyệt Chương trình mục tiêu quốc gia xây dựng nông thôn mới giai đoạn 2010 - 2020, Hà Nội, 2010.

[8] Nguyễn Thị Hồng, Trần Minh Hải. Vai trò của vật liệu xanh trong phát triển nông thôn bền vững. Tạp chí Khoa học Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số. 16(2), tr. 15-23, 2022.

[9] Nguyễn Hữu Thọ, Lê Thị Thanh Hằng. Đô thị hóa và ảnh hưởng đến kiến trúc nông thôn tại vùng Đông Nam Bộ. Tạp chí Khoa học xã hội vùng Nam Bộ, số 5(112), tr. 34-42, 2021.

[10] Đỗ Trọng Chung. Đánh giá những biến đổi và một số định hướng giải pháp cho tổ chức môi trường ở nông thôn vùng đồng bằng sông Hồng giai đoạn 1986 đến nay. Kỷ yếu Hội thảo Quy hoạch làng xã nông thôn ĐBSH tầm nhìn 2030, Trường Đại học Xây dựng, 12/2014.

[11] Trần Văn Thành. Ứng dụng công nghệ trong quy hoạch và thiết kế nông thôn mới: Từ chính sách đến thực tiễn. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2023.

■Ngày nhận bài: 22/8/2026 ■Ngày sửa bài: 03/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 10/9/2026

Biến đổi hệ giá trị kiến trúc chùa Khmer vùng Tây Nam Bộ trong bối cảnh đương đại và định hướng bảo tồn

Changes in the architectural value system of Khmer buddhist temples in Southwestern Vietnam in the contemporary context and conservation orientations

> THS.KTS TRẦN LÊ VĨNH TRÀ[1,*], TS.KTS NGÔ THỊ KIM DUNG[2]
[1]GV Khoa Kiến trúc, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
[2]GV Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[*]Email: tranlevinhtra@mtu.edu.vn

TÓM TẮT

Chùa Khmer ở khu vực Tây Nam Bộ (TNB) là di sản sống, nơi thuộc tính vật chất, không gian, thực hành tôn giáo và đời sống cộng đồng tiếp tục biến đổi trong quá trình sử dụng. Nghiên cứu phân tích quan hệ giữa biến đổi thuộc tính và hệ giá trị kiến trúc, nhận diện các dạng vận động và giới hạn thay đổi cần kiểm soát. Dữ liệu gồm bốn cấp: danh mục khoảng 446 chùa; khảo sát 100 trường hợp; đánh giá sâu 20 chùa bằng 58 tiêu chí thuộc chín nhóm giá trị; kiểm chứng sáu trường hợp tương phản. Bằng chứng thực địa, tư liệu trước - sau, phỏng vấn, bảng hỏi và đánh giá chuyên gia được đối chiếu chéo. Kết quả cho thấy các nhóm giá trị không biến đổi đồng thời; một số thuộc tính vật chất có thể suy giảm trong khi thực hành tôn giáo và vai trò cộng đồng vẫn được duy trì. Năm dạng vận động gồm kế thừa - bảo lưu, thích ứng, tích hợp, suy giảm và tái tạo. Các dạng này được xác định từ tình trạng thuộc tính, chiều biến đổi và khả năng biểu đạt, duy trì hoặc trao truyền giá trị, không từ ngưỡng điểm cố định. Kết quả hỗ trợ lựa chọn mức can thiệp theo từng trường hợp.

Từ khóa: Chùa Khmer; di sản sống; hệ giá trị; vận động giá trị; bảo tồn dựa trên giá trị.

ABSTRACT

Khmer Buddhist temples in Southwestern Vietnam are living heritage in which material fabric, spatial organization, religious practices, and community life continue to change through use. This study examines how changes in value-bearing attributes affect the architectural value system and identifies modes of value dynamics and limits of change. Evidence comprises an inventory of about 446 temples, surveys of 100 cases, in-depth assessment of 20 temples using 58 criteria across nine groups, and verification through six contrasting cases. Field evidence, before-and-after documentation, interviews, questionnaires, and expert assessments were triangulated. Values did not change simultaneously or to the same degree. Five modes were identified: inheritance-preservation, adaptation, integration, decline, and regeneration. They are determined by attribute condition, direction of change, and capacity to express, sustain, or transmit value rather than a fixed score. The framework supports case-specific conservation interventions.

Keywords: Khmer Buddhist temples; living heritage; heritage value system; value dynamics; values-based conservation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chùa Khmer vùng TNB vừa là quần thể kiến trúc tôn giáo, vừa là thiết chế duy trì Phật giáo Nam tông và sinh hoạt cộng đồng. Giá trị được biểu đạt qua quan hệ giữa chính điện, sala, tăng xá, sân lễ hội, cảnh quan, nghi lễ, ký ức và cộng đồng sử dụng [1, 2]. Việc sử dụng liên tục cho phép tiếp cận chùa Khmer như một dạng di sản sống.

Sử dụng liên tục tạo nhu cầu mở rộng công năng, bổ sung công trình, thay vật liệu và thích ứng với đô thị hóa. Những can thiệp này có thể duy trì hoạt động nhưng cũng làm suy yếu lớp vật chất, quan hệ không gian hoặc kỹ năng tạo tác. Vấn đề bảo tồn vì vậy là phân biệt thay đổi còn tiếp nối giá trị với thay đổi bắt đầu làm tổn thương thuộc tính khó thay thế.

Bảo tồn dựa trên giá trị xem ý nghĩa văn hóa và thuộc tính mang giá trị là căn cứ của quyết định can thiệp [3, 4, 5, 6]; Nara Document mở rộng tính xác thực sang vật liệu, sử dụng, kỹ thuật, địa điểm và tinh thần [7]. Tiếp cận di sản sống nhấn mạnh tính liên tục của chức năng và cộng đồng [8, 9, 10]. Các nghiên cứu tại Angkor Thom, Takbai và Luang Prabang cho thấy di sản Phật

giáo Nam tông biến đổi trong quan hệ giữa cấu trúc tu viện, lịch sử sử dụng và thực hành xã hội [11, 12, 13, 14]. Khoảng trống còn lại là cách nối biến đổi thuộc tính với chiều vận động của hệ giá trị và giới hạn cần kiểm soát.

Trên nền kết quả đã công bố về chín nhóm giá trị, các biểu hiện biến đổi và những thách thức bảo tồn từ cùng hệ dữ liệu [15], nghiên cứu này tập trung vào logic vận động của hệ giá trị: (1) quan hệ giữa biến đổi thuộc tính và biến đổi giá trị; (2) năm dạng vận động được kiểm tra bằng tư liệu trước - sau và các trường hợp tương phản; (3) dấu hiệu chuyển trạng thái và giới hạn thay đổi. Các kết quả đã công bố được sử dụng như dữ liệu nền để kiểm chứng quan hệ động, không được trình bày lại như phát hiện mới.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ KHUNG PHÂN TÍCH

2.1. Giá trị, thuộc tính mang giá trị và di sản sống

Trong bảo tồn dựa trên giá trị, ý nghĩa di sản được chuyển tải qua vật liệu, cấu kiện, hình thái, quan hệ không gian, cảnh quan, công năng, nghi lễ, kỹ thuật và ký ức [3, 4, 5, 6]. Một thuộc tính có thể chuyển tải nhiều giá trị và một giá trị có thể được biểu hiện qua nhiều thuộc tính; vì vậy, mức độ còn nguyên của vật chất không đủ để thay thế việc đọc quan hệ thuộc tính – giá trị.

Đối với di sản tôn giáo còn hoạt động, chức năng và cộng đồng sử dụng là một phần của bằng chứng bảo tồn [8, 9, 10]. Tuy nhiên, "di sản sống" không hợp thức hóa mọi thay đổi. Điểm cao ở một nhóm không bù được mất mát cốt lõi ở nhóm khác; nguyên tắc không bù trừ được dùng để tránh biến điểm tổng hợp thành lý do chấp nhận can thiệp.

2.2. Vận động giá trị, độ trễ và giới hạn thay đổi

Trong nghiên cứu này, biến đổi hệ giá trị là sự thay đổi về khả năng biểu đạt, duy trì và trao truyền giá trị khi các thuộc tính mang giá trị biến đổi dưới tác động của sử dụng và bối cảnh đương đại. "Độ trễ giá trị" là khái niệm thao tác mô tả trường hợp thuộc tính vật chất đã suy yếu nhưng một số giá trị vẫn được duy trì nhờ nghi lễ, ký ức hoặc cộng đồng; đây không phải chỉ số thời gian hay lý thuyết phổ quát. Độ trễ chỉ được nhận diện khi điểm số được đọc cùng tư liệu trước - sau và bằng chứng hiện trường.

Giới hạn thay đổi được xem xét theo vai trò, khả năng phục hồi và mức dễ tổn thương của thuộc tính. Cảnh báo xuất hiện khi biến đổi làm mất thuộc tính khó thay thế, cắt đứt quan hệ không gian – nghi lễ, làm suy yếu kỹ thuật hoặc chủ thể trao truyền, hay lan tác động sang nhiều nhóm giá trị. Khung phân tích đi từ bối cảnh và tác nhân → biến đổi thuộc tính → tác động đến khả năng biểu đạt, duy trì và trao truyền → dạng vận động → giới hạn thay đổi → phản hồi và điều chỉnh can thiệp.

Hình 1. Khung phân tích biến đổi hệ giá trị và giới hạn thay đổi. *Nguồn: Tác giả tổng hợp*

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Thiết kế mẫu và phạm vi dữ liệu

Nghiên cứu tổ chức bốn cấp dữ liệu. Danh mục khoảng 446 chùa Khmer Nam tông tạo khung tổng thể về phân bố, niên đại và tình trạng quản lý. Từ danh mục này, 100 chùa được lựa chọn có chủ đích theo nguyên tắc cân bằng tương đối giữa các địa phương và các nhóm phân loại, bảo đảm độ phủ về không gian, niên đại, tình trạng pháp lý, mức can thiệp và vai trò cộng đồng; tầng này dùng để nhận diện biến thiên không gian - hình thái tại thời điểm khảo sát, không suy luận biến đổi lịch đại. Từ 100 trường hợp, 20 chùa được chọn phân tầng có chủ đích theo năm trục nêu trên; mẫu gồm 11 trường hợp trước năm 1700, 5 trường hợp giai đoạn 1700 - 1900 và 4 trường hợp sau năm 1900. Sáu trường hợp tương phản tiếp tục được chọn để kiểm chứng các cấu hình bảo lưu, thích ứng, tái tạo sau biến cố, suy giảm cảnh quan, tích hợp vật liệu - nghệ thuật và xây mới đối chứng. Các tầng mẫu phục vụ khái quát hóa phân tích, không đại diện thống kê.

Mẫu 20 chùa không phải mẫu xác suất và không dùng để suy rộng tỷ lệ cho toàn khu vực TNB. Chức năng của mẫu là duy trì độ biến thiên cần thiết để kiểm tra quan hệ giữa thuộc tính, giá trị và tác động; điểm trung bình và chênh lệch điểm chỉ có ý nghĩa mô tả.

3.2. Thu thập bằng chứng và đánh giá giá trị

Mỗi trường hợp được khảo sát ở ba cấp: khuôn viên, công trình thành phần và cách sử dụng; lặp hai đến ba lần theo mùa hoặc dịp lễ hội khi có điều kiện. Dữ liệu gồm đo vẽ, ảnh hiện trạng, quan sát vật liệu - cấu tạo - trang trí - cảnh quan, hồ sơ di tích, ảnh tư liệu, bản vẽ, bia ký và thông tin tu bổ. Phỏng vấn bán cấu trúc khoảng 5 - 10 người/chùa gồm sư trụ trì, Achar (người phụ trách nghi lễ), người cao tuổi và cư dân; khoảng 100 bảng hỏi bổ trợ thông tin về sử dụng, ký ức và vai trò cộng đồng.

Công cụ đánh giá gồm 58 tiêu chí thuộc chín nhóm: lịch sử, kiến trúc, nghệ thuật, cảnh quan, tôn giáo - tinh thần, cộng đồng, kỹ thuật - vật liệu, bản sắc và thích ứng. Tiêu chí được xây dựng từ cơ sở lý luận, quy đổi thành thuộc tính quan sát được, đối chiếu với dữ liệu 100 chùa và hiệu chỉnh qua chuyên gia. Thang năm mức dùng các mốc 1-3-5, điểm 2 và 4 là trung gian. Mỗi chùa có năm lượt đánh giá độc lập; nếu cùng một tiêu chí chênh từ 1 điểm trở lên hoặc có thể làm thay đổi nhận định nhóm giá trị, hồ sơ bằng chứng được đối chiếu lại trước khi tổng hợp. Điểm nhóm là trung bình các tiêu chí thành phần và chỉ dùng mô tả, đối chiếu trường hợp, không làm ngưỡng can thiệp. Nhóm thích ứng phản ánh khả năng đáp ứng nhu cầu mới mà không làm suy yếu giá trị cốt lõi, không phải một giá trị văn hóa độc lập.

3.3. Quy tắc nhận diện dạng vận động và giới hạn thay đổi

Dạng vận động không được xác định từ tổng điểm riêng lẻ. Ba lớp bằng chứng được phân biệt: quan sát trực tiếp; tái dựng có căn cứ từ tư liệu trước - sau; và suy luận có điều kiện khi dữ liệu chưa đầy đủ. Cấu hình điểm, tình trạng thuộc tính và bằng chứng về chiều biến đổi phải được đọc cùng nhau. Suy giảm được ghi nhận khi khả năng biểu đạt, duy trì hoặc trao truyền yếu đi; tái tạo chỉ được ghi nhận khi có bằng chứng cho thấy giá trị hoặc quan hệ từng suy yếu được củng cố trở lại. Thiếu bằng chứng trước - sau, nghiên cứu chỉ ghi nhận hiện trạng hoặc dấu hiệu can thiệp.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Sự không đồng thời và năm dạng vận động của hệ giá trị

Tầng khảo sát 100 chùa được dùng để nhận diện phổ biến thiên hình thái (Bảng 1) trước khi lựa chọn 20 trường hợp nghiên cứu sâu. Mẫu 20 được rút từ phổ này để giữ các cấu hình chính và trường hợp tương phản, không tái lập tỷ lệ của tầng 100.

Bảng 1. Phân loại biến thiên hình thái của 100 chùa Khmer được khảo sát ở khu vực TNB

Tiêu chí	Phân loại	Số lượng
Mặt bằng	Loại 1 - không hành lang bao quanh	2
Mặt bằng	Loại 2 - hành lang, lối vào ở 2 hướng	74
Mặt bằng	Loại 3 - hành lang bao quanh, lối vào ở 4 hướng	24
Thức mái	Nguyên bản - không tháp nhọn	36
Thức mái	Đương đại - tháp dạng chuông	58
Thức mái	Đương đại - tháp dạng Angkor	6
Mặt đứng	Chính điện 1 tầng	91
Mặt đứng	Chính điện ≥ 2 tầng	9

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ dữ liệu nghiên cứu.

Kết quả đã công bố trên cùng mẫu 20 chùa cho thấy giá trị tôn giáo - tinh thần đạt 4,43/5, trong khi kỹ thuật - vật liệu đạt 3,72/5 [15]. Trong bài này, hai mức điểm chỉ đóng vai trò tín hiệu mô tả để mở kiểm chứng quan hệ động. Khi đối chiếu tư liệu trước - sau, vật liệu, cấu kiện hoặc cảnh quan có thể thay đổi rõ trong khi nghi lễ, vai trò cộng đồng và khả năng nhận diện vẫn được duy trì; các thành phần của hệ giá trị vì vậy không nhất thiết vận động cùng chiều và cùng tốc độ.

Từ tình trạng thuộc tính, chiều biến đổi và khả năng tiếp tục biểu đạt, duy trì hoặc trao truyền giá trị, năm dạng vận động được nhận diện gồm kế thừa - bảo lưu, thích ứng, tích hợp, suy giảm và tái tạo. Các dạng này không phải các giai đoạn của một chuỗi tuyến tính và không loại trừ nhau; trong cùng một chùa, những thuộc tính hoặc nhóm giá trị khác nhau có thể đồng thời biểu hiện các dạng vận động khác nhau

Bảng 2. Năm dạng vận động của hệ giá trị và định hướng bảo tồn

Dạng vận động	Dấu hiệu nhận diện	Định hướng bảo tồn
Kế thừa - bảo lưu	Vật chất, không gian nghi lễ, ký ức và chủ thể trao truyền còn liên kết tương đối bền, cho phép các giá trị tiếp tục được biểu đạt và truyền nối.	Bảo dưỡng thường xuyên; ưu tiên sửa chữa tại chỗ; hạn chế thay thế thuộc tính gốc hoặc khó thay thế.
Thích ứng	Công năng hoặc cấu trúc được điều chỉnh để đáp ứng nhu cầu mới nhưng quan hệ cốt lõi và khả năng nhận diện vẫn được duy trì.	Cho phép thay đổi có điều kiện; kiểm soát vị trí, quy mô và ảnh hưởng đến không gian, nghi lễ và thuộc tính cốt lõi.
Tích hợp	Yếu tố mới tham gia vào hình thức, nghệ thuật hoặc sử dụng mà lớp giá trị trước chưa bị che lấp hay thay thế đáng kể.	Kiểm soát tính tương thích của vật liệu, kỹ thuật, hình thức, khả năng bảo trì và mức độ can thiệp của phần mới.
Suy giảm	Khả năng biểu đạt, duy trì hoặc trao truyền một hay nhiều giá trị bị suy yếu do mất mát, thay thế hoặc biến đổi thuộc tính và quan hệ mang giá trị.	Ưu tiên bảo vệ thuộc tính khó thay thế; dừng hoặc điều chỉnh can thiệp gây mất mát; lập hồ sơ trước xử lý.
Tái tạo	Giá trị hoặc quan hệ mang giá trị từng suy yếu được củng cố trở lại trên cơ sở bằng chứng và sự tiếp nối của các thực hành liên quan.	Tái tạo có căn cứ; phân biệt tái tạo giá trị với phục dựng hình thức; theo dõi và kiểm chứng sau can thiệp.

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ dữ liệu nghiên cứu

4.2. Dấu hiệu cảnh báo và giới hạn thay đổi

Dữ liệu không hỗ trợ việc quy một ngưỡng điểm cố định thành quyết định tu bổ. Cảnh báo xuất hiện khi biến đổi chạm tới thuộc tính khó thay thế, quan hệ không gian gắn với nghi lễ, kỹ thuật – tri thức truyền thống hoặc cơ chế trao truyền; mức cảnh báo tăng khi tác động lan sang nhiều nhóm giá trị. Điểm số chỉ là tín hiệu mở hồ sơ kiểm chứng, không phải quyết định can thiệp.

Nguy cơ đứt gãy không phải dạng vận động thứ sáu mà là mức cảnh báo của trạng thái suy giảm. Cảnh báo trở nên đáng kể khi thuộc tính cốt lõi mất khả năng phục hồi hoặc bị thay thế mà không còn bằng chứng, đồng thời một kênh duy trì giá trị như nghi lễ, kỹ năng, ký ức hoặc chủ thể trao truyền bị suy yếu. Cách xác định này giữ giới hạn ở cấp quan hệ và bằng chứng, không quy về một mốc điểm số.

4.3. Kiểm chứng qua các trường hợp tương phản

Một phần dữ liệu hiện trạng của các trường hợp đã xuất hiện trong công bố trước [15]. Ở đây, sáu trường hợp được tái phân tích theo tư liệu trước - sau và bằng chứng hiện trường để kiểm tra các dạng vận động, không nhằm đại diện thống kê. Dạng vận động chỉ được xác nhận khi các lớp bằng chứng nhất quán; kết quả trình bày tại Bảng 3.

Do giới hạn dung lượng, tư liệu ảnh và bản vẽ trước - sau không trình bày trong bài; hồ sơ khảo sát được lưu để phục vụ thẩm định khi cần.

Bảng 3. Kiểm chứng sáu trường hợp tương phản theo dạng vận động

Trường hợp	Bằng chứng trước - sau/đối chiếu	Kết quả kiểm chứng
Chùa Âng	Lớp vật chất, không gian nghi lễ và vai trò sử dụng còn duy trì; đồng thời xuất hiện một số tín hiệu suy giảm sớm.	Kế thừa - bảo lưu; cảnh báo suy giảm sớm.
Chùa Ông Mẹt	Nhu cầu giáo dục mới được đáp ứng nhưng trật tự không gian và các quan hệ cốt lõi vẫn được duy trì.	Thích ứng có kiểm soát.
Chùa Dơi	Có lớp giá trị trước biến cố và bằng chứng cho thấy một số quan hệ, chức năng và ý nghĩa được nối lại sau phục dựng.	Tái tạo có điều kiện; chỉ xác nhận khi đủ bằng chứng trước – sau.
Chùa Pitu Khôsa Răngsây	Cảnh quan suy giảm rõ trong khi kiến trúc và nghệ thuật chưa suy yếu tương ứng.	Suy giảm cục bộ ở cảnh quan.
Chùa Chén Kiểu	Sự tích hợp vật liệu và kỹ thuật trang trí tạo đặc trưng nhận diện nhưng đồng thời làm tăng yêu cầu bảo trì.	Tích hợp; cần kiểm soát kỹ thuật và bảo trì.
Chùa Bàu Sơn (Ô Ta Pâu)	Công trình hình thành mới, không có lớp giá trị trước để nối lại theo nghĩa tái lập một quan hệ đã suy yếu.	Đối chứng: hình thành giá trị mới, không xếp vào tái tạo.

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ dữ liệu nghiên cứu

5. THẢO LUẬN VÀ HÀM Ý BẢO TỒN

5.1. Vận động không đồng thời trong bối cảnh di sản tôn giáo sống

Đối chiếu khu vực cho thấy di sản Phật giáo Nam tông luôn gắn vật chất với thực hành: Angkor Thom được đọc theo lịch sử sử dụng [11], Takbai theo cấu hình tu viện và chức năng xã hội [12], còn Luang Prabang cho thấy căng thẳng giữa bảo tồn vật chất và thực hành tôn giáo [13, 14]. Với chùa Khmer TNB, đóng góp của bài nằm ở chuỗi thuộc tính → tác động → dạng vận động → giới hạn thay

đổi, qua đó phân biệt thích ứng còn nâng đỡ giá trị với thay đổi bắt đầu làm suy yếu thuộc tính khó thay thế.

5.2. Vai trò của dạng vận động trong quyết định bảo tồn

Kế thừa khung quản lý sự thay đổi đã công bố [15], nghiên cứu này sử dụng năm dạng vận động như một lớp hỗ trợ quyết định, gồm: nhận diện thuộc tính hoặc quan hệ đã chạm giới hạn thay đổi; xác định dạng vận động đang chi phối; và lựa chọn mức can thiệp cùng yêu cầu theo dõi sau can thiệp. Với di tích đã xếp hạng, bảo quản, tu bổ, phục hồi hoặc tôn tạo vẫn phải tuân thủ Luật Di sản văn hóa và hồ sơ khoa học theo quy định [16].

Mức can thiệp thay đổi theo độ nhạy của thuộc tính. Không gian thiêng, bố cục chủ đạo, vật liệu - kỹ thuật đặc trưng và thành phần cảnh quan có vai trò nhận diện cần được xem xét thận trọng; hạng mục phục vụ có thể linh hoạt nếu không làm suy yếu cấu trúc tổng thể. Hồ sơ hiện trạng cần được cập nhật sau can thiệp để phát hiện sớm chuyển từ thích ứng sang suy giảm.

5.3. Giới hạn nghiên cứu

Tầng 100 và mẫu 20 chùa được chọn có chủ đích, không dùng để suy rộng tỷ lệ cho toàn vùng. Thiết kế chủ yếu cắt ngang; dù có tư liệu trước - sau và sáu trường hợp kiểm chứng, độ trễ mới được nhận diện như quan hệ bất đồng bộ, chưa phải đại lượng thời gian. Năm lượt đánh giá giúp phát hiện chênh lệch và quay lại hồ sơ bằng chứng, nhưng chưa báo cáo hệ số đồng thuận liên người chấm; bộ 58 tiêu chí vì vậy chưa phải thang đo chuẩn hóa.

6. KẾT LUẬN

Biến đổi hệ giá trị kiến trúc chùa Khmer vùng TNB không thể suy ra trực tiếp từ biến đổi vật chất. Dữ liệu 20 trường hợp và sáu trường hợp kiểm chứng cho thấy vật liệu, cấu kiện hoặc cảnh quan có thể suy yếu trong khi nghi lễ, vai trò cộng đồng và khả năng nhận diện vẫn được duy trì; sự không đồng thời này phải được đọc qua quan hệ thuộc tính - giá trị, không theo cơ chế bù trừ.

Năm dạng vận động gồm kế thừa - bảo lưu, thích ứng, tích hợp, suy giảm và tái tạo cho phép nhận diện chiều hướng biến đổi mà không gắn nhãn cố định cho toàn bộ ngôi chùa. Giới hạn thay đổi xuất hiện khi can thiệp làm suy yếu thuộc tính hoặc quan hệ khó thay thế, đặc biệt là quan hệ không gian - nghi lễ, vật liệu - kỹ thuật và cơ chế trao truyền. Điểm số chỉ hỗ trợ phát hiện trường hợp cần xem xét sâu; quyết định bảo tồn phải quay lại bằng chứng của từng thuộc tính.

Đóng góp riêng của bài nằm ở việc chuyển từ cấu hình giá trị tại một thời điểm sang logic thuộc tính - tác động - dạng vận động - giới hạn thay đổi. Khả năng chuyển giao nằm ở logic quan hệ này, không ở tỷ lệ phân bố năm dạng; cách tiếp cận hỗ trợ thiết kế, thẩm định và quản lý bảo tồn theo từng trường hợp.

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] Đặng Lê Huệ. Nghệ thuật kiến trúc và trang trí chùa Khmer Nam Bộ (Trường hợp chùa Chantarangsay TP Hồ Chí Minh). Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Khoa học Xã hội và Nhân văn, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2017.

[3] E. Avrami, R. Mason, M. de la Torre. Values and Heritage Conservation: Research Report. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2000.

[4] M. de la Torre (Ed.). Assessing the Values of Cultural Heritage. Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2002.

[5] R. Mason. Assessing values in conservation planning: Methodological issues and choices. In M. de la Torre (Ed.). Assessing the Values of Cultural Heritage, Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 5-30, 2002.

[6] Australia ICOMOS. The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance 2013. Australia ICOMOS, 2013.

[7] ICOMOS. The Nara Document on Authenticity. Nara, Japan, 1994.

[8] S. Court, G. Wijesuriya. People-Centred Approaches to the Conservation of Cultural Heritage: Living Heritage. ICCROM, Rome, 2015.

[9] I. Poulios. Discussing strategy in heritage conservation: Living heritage approach as an example of strategic innovation. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, vol. 4, no. 1, pp. 16-34, 2014, doi: 10.1108/JCHMSD-10-2012-0048.

[10] H. Stovel, N. Stanley-Price, R. Killick (Eds.). Conservation of Living Religious Heritage. ICCROM, Rome, 2005.

[11] A. Harris, T. Tin, S. Soeng, H. He, V. Chheng, S. Chhouk. Towards a temporal assessment of Angkor Thom's Theravada "Buddhist Terrace" archaeology. Asian Archaeology, vol. 6, no. 2, pp. 167-183, 2022, doi: 10.1007/s41826-022-00056-y.

[12] K. Sene Na Ayuddhaya, K. Kirdsiri. Southern Buddhist Monasteries: Typology of Buddhist Monasteries Architectures in Takbai, Narathiwas Province and the Observations on Function and Architectural Configuration in Local Society and Culture Context. Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS), vol. 15, no. 1, pp. 147-164, 2018, doi: 10.56261/jars.v15i1.156360.

[13] L. Bear, N. Avieli, J. Feldman. UNESCO World Heritage Sites: shared shrines or contested sanctuaries? The case of the Buddhist temples of Luang Prabang, Laos. Journal of Heritage Tourism, vol. 16, no. 1, pp. 1-19, 2021, doi: 10.1080/1743873X.2020.1759609.

[14] D. Berliner. Multiple nostalgias: the fabric of heritage in Luang Prabang (Lao PDR). Journal of the Royal Anthropological Institute, vol. 18, no. 4, pp. 769-786, 2012, doi: 10.1111/j.1467-9655.2012.01791.x.

[15] 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.

[16] Quốc hội. Luật Di sản văn hóa số 45/2024/QH15 ngày 23/11/2024, Hà Nội, 2024.

■Ngày nhận bài: 18/8/2026 ■Ngày sửa bài: 26/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 07/9/2026

Quản lý bãi chôn lấp chất thải rắn sinh hoạt tại Việt Nam - Thực trạng và giải pháp

Municipal solid waste landfill management in Vietnam - Current status and solutions

> TS DƯƠNG THỊ THANH XUYẾN[1], PGS.TS NGUYỄN THỊ HỒNG HẠNH[1,*]
[1]Khoa Môi trường, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội
[*]Email: nthhanh.mt@hunre.edu.vn

TÓM TẮT

Chôn lấp vẫn là phương thức xử lý chất thải rắn sinh hoạt (CTRSH) phổ biến tại Việt Nam, giữ vai trò quan trọng trong bảo đảm năng lực xử lý chất thải, nhưng đang bộc lộ nhiều hạn chế về hạ tầng, công nghệ và kiểm soát ô nhiễm. Nghiên cứu sử dụng kết hợp phương pháp thu thập, tổng hợp số liệu thứ cấp và sơ cấp; thống kê, phân tích số liệu; rà soát chính sách, pháp luật; phân tích SWOT và tham vấn chuyên gia để đánh giá toàn diện công tác quản lý bãi chôn lấp CTRSH. Kết quả cho thấy cả nước hiện có khoảng 1.178 bãi chôn lấp, trong đó tỷ lệ bãi chôn lấp không hợp vệ sinh còn cao, hệ thống chủ yếu có quy mô nhỏ, phân tán và điều kiện hạ tầng giữa các địa phương còn chênh lệch. Các vấn đề môi trường nổi bật gồm ô nhiễm nước rỉ rác, phát thải khí metan, tình trạng quá tải, cùng những bất cập trong vận hành, quan trắc và đóng cửa, phục hồi môi trường sau khi kết thúc hoạt động. Bên cạnh đó, nguồn lực tài chính, công nghệ và nhân lực còn hạn chế, trong khi cơ chế đầu tư, xã hội hóa và các chính sách hỗ trợ chuyển đổi chưa đáp ứng yêu cầu. Việc triển khai phân loại CTRSH tại nguồn, phát triển kinh tế tuần hoàn và thực hiện mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính đang đặt ra yêu cầu đổi mới mô hình quản lý bãi chôn lấp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất các nhóm giải pháp về hoàn thiện thể chế, chính sách; nâng cấp hạ tầng, công nghệ; tăng cường thu gom và sử dụng khí metan; đẩy mạnh chuyển đổi số và huy động nguồn lực tài chính. Đồng thời, cần rà soát, phân loại các bãi chôn lấp theo mức độ rủi ro để có lộ trình cải tạo, nâng cấp hoặc đóng cửa phù hợp. Về lâu dài, cần giảm dần sự phụ thuộc vào chôn lấp trực tiếp, tăng cường giảm thiểu, tái sử dụng, tái chế và thu hồi năng lượng từ CTRSH. Qua đó, từng bước chuyển bãi chôn lấp từ phương thức xử lý chủ đạo sang công đoạn cuối cùng tiếp nhận phần chất thải còn lại, góp phần kiểm soát ô nhiễm, giảm phát thải khí nhà kính và thực hiện mục tiêu phát triển bền vững, kinh tế tuần hoàn và phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050.

Từ khóa: Bãi chôn lấp; chất thải rắn sinh hoạt; Việt Nam; vai trò; chính sách; thực trạng; tồn tại hạn chế; giải pháp.

ABSTRACT

Landfilling remains a common municipal solid waste (MSW) treatment method in Vietnam and plays an important role in ensuring waste treatment capacity; however, it is facing significant limitations in terms of infrastructure, technology, and pollution control. This study employs a combination of primary and secondary data collection and synthesis, statistical analysis, policy and legal review, SWOT analysis, and expert consultation to provide a comprehensive assessment of MSW landfill management in Vietnam. The results indicate that there are currently approximately 1,178 landfills nationwide, with a high proportion of non-sanitary landfills. The landfill system is predominantly small-scale and scattered, while infrastructure conditions vary considerably among localities. Major environmental concerns include leachate pollution, methane emissions, overloading, as well as shortcomings in operation, environmental monitoring, and landfill closure and post-closure environmental rehabilitation. In addition, financial, technological, and human resources remain limited, while investment, socialization, and transition-support mechanisms have not yet met current requirements. The implementation of source separation of MSW, development of a circular economy, and achievement of greenhouse gas emission reduction targets are creating an urgent need to innovate landfill management models. Accordingly, this study proposes several groups of solutions, including improving institutions and policies; upgrading infrastructure and technologies; enhancing methane collection and utilization; promoting digital transformation; and mobilizing financial resources. At the same time, landfills should be reviewed and classified according to their level of environmental risk to establish

appropriate roadmaps for rehabilitation, upgrading, or closure. In the long term, direct dependence on landfilling should be gradually reduced, while waste reduction, reuse, recycling, and energy recovery from MSW should be strengthened. This will facilitate the gradual transformation of landfills from the dominant waste treatment method into the final stage for receiving residual waste, thereby contributing to pollution control, greenhouse gas emission reduction, and the achievement of sustainable development, circular economy, and net-zero emissions targets by 2050.

Keywords: Landfill; municipal solid waste; Vietnam; role; policy; current status; limitations; solutions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, lượng CTRSH tại Việt Nam gia tăng nhanh do đô thị hóa, công nghiệp hóa và tăng dân số, tạo áp lực lớn lên hệ thống thu gom, vận chuyển và xử lý [4]. Mặc dù các công nghệ tiên tiến như đốt rác phát điện, compost và xử lý theo hướng kinh tế tuần hoàn ngày càng được áp dụng, chôn lấp vẫn là phương thức xử lý phổ biến, trong khi nhiều bãi chôn lấp quá tải, chưa hợp vệ sinh hoặc chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu bảo vệ môi trường [5]. Trong khi đó, Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 định hướng quản lý CTRSH theo thứ tự ưu tiên: giảm thiểu, tái sử dụng, tái chế, thu hồi năng lượng và cuối cùng mới xử lý, chôn lấp [1]. Việc phân loại CTRSH tại nguồn, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và giảm chôn lấp đang đặt ra yêu cầu đổi mới công tác quy hoạch, đầu tư, vận hành và quản lý các bãi chôn lấp hiện hữu. Vì vậy, việc đánh giá toàn diện thực trạng quản lý bãi chôn lấp CTRSH, xác định các tồn tại, hạn chế và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả quản lý, kiểm soát ô nhiễm, giảm phát thải khí nhà kính và từng bước giảm tỷ lệ chôn lấp là cần thiết.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- *Phương pháp thu thập và tổng hợp tài liệu, số liệu:* Nghiên cứu sử dụng kết hợp số liệu thứ cấp và số liệu sơ cấp. Số liệu thứ cấp được thu thập trong khoảng thời gian từ tháng 01 đến tháng 12 năm 2025, tổng hợp từ các báo cáo, số liệu thống kê của cơ quan quản lý nhà nước về môi trường, các văn bản quy phạm pháp luật, quy hoạch, chiến lược, chương trình, đề án liên quan đến quản lý CTRSH và bãi chôn lấp; đồng thời tham khảo các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước có liên quan. Các thông tin được thu thập tập trung vào hiện trạng phát sinh, thu gom, xử lý CTRSH; số lượng, quy mô, loại hình và công nghệ của các bãi chôn lấp; tình hình đầu tư, vận hành, đóng cửa và phục hồi bãi chôn lấp; cũng như các vấn đề môi trường phát sinh trong quá trình quản lý. Số liệu sơ cấp được bổ sung thông qua khảo sát, trao đổi với cơ quan quản lý, đơn vị vận hành và các đối tượng có liên quan nhằm làm rõ thực trạng, khó khăn và các vấn đề đặt ra trong quản lý bãi chôn lấp.

- Phương pháp thống kê, tổng hợp và phân tích số liệu: Các số liệu được tổng hợp, phân loại và xử lý theo các nhóm nội dung về phát sinh, thu gom, xử lý CTRSH và quản lý bãi chôn lấp. Phân tích thống kê mô tả được sử dụng để xác định quy mô, tỷ lệ và xu hướng biến động của các chỉ tiêu; đồng thời so sánh giữa các địa phương, vùng và giữa các loại hình bãi chôn lấp để đánh giá mức độ đáp ứng yêu cầu quản lý và bảo vệ môi trường. Trên cơ sở đó, nghiên cứu nhận diện những kết quả đạt được, tồn tại, hạn chế và các vấn đề cần ưu tiên giải quyết.

- Phương pháp rà soát, phân tích chính sách và pháp luật: Nghiên cứu rà soát các quy định pháp luật, chính sách, chiến lược, quy hoạch và tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật liên quan đến quản lý CTRSH và bãi chôn lấp. Nội dung phân tích tập trung vào các yêu cầu về quy hoạch, đầu tư, lựa chọn công nghệ, xây dựng và vận hành bãi chôn lấp; kiểm soát ô nhiễm; quan trắc và giám sát môi trường; đóng cửa, cải tạo và phục hồi môi trường đối với bãi chôn lấp. Qua đó, đánh giá mức độ đầy đủ, đồng bộ và khả năng thực thi của hệ thống chính sách, pháp luật hiện hành, làm cơ sở đề xuất hoàn thiện cơ chế quản lý.

- Phương pháp phân tích SWOT: Trên cơ sở kết quả tổng hợp, thống kê và đánh giá thực trạng, nghiên cứu sử dụng ma trận SWOT để xác định điểm mạnh, điểm yếu, cơ hội và thách thức trong quản lý bãi chôn lấp CTRSH tại Việt Nam. Phân tích tập trung vào các yếu tố về thể chế, năng lực quản lý, nguồn lực đầu tư, cơ sở hạ tầng, công nghệ xử lý, năng lực vận hành, kiểm soát ô nhiễm và định hướng giảm chôn lấp. Kết quả phân tích SWOT được sử dụng để xác định các nhóm giải pháp phù hợp, bao gồm phát huy điểm mạnh để tận dụng cơ hội, khắc phục điểm yếu, hạn chế thách thức và từng bước chuyển đổi mô hình quản lý bãi chôn lấp theo hướng an toàn, hiệu quả và bền vững.

- *Phương pháp tham vấn chuyên gia:* Nghiên cứu tham khảo ý kiến của các chuyên gia, nhà khoa học, cơ quan quản lý và đơn vị có kinh nghiệm trong lĩnh vực quản lý CTRSH, xử lý và vận hành bãi chôn lấp để kiểm chứng, bổ sung và hoàn thiện việc đánh giá thực trạng cũng như đề xuất giải pháp. Ý kiến chuyên gia được sử dụng nhằm xác định các vấn đề trọng tâm, tính khả thi và thứ tự ưu tiên của các nhóm giải pháp.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thực trạng quản lý bãi chôn lấp CTRSH tại Việt Nam

3.1.1. Thực trạng hệ thống bãi chôn lấp

Mặc dù Việt Nam đang từng bước chuyển dịch từ mô hình xử lý chất thải dựa chủ yếu vào chôn lấp sang mô hình quản lý tổng hợp theo hướng kinh tế tuần hoàn, chôn lấp vẫn là phương thức xử lý CTRSH phổ biến nhất hiện nay.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, trên phạm vi cả nước tính đến tháng 12/2025 có khoảng 1.550 cơ sở xử lý CTRSH, trong đó có 1.178 bãi chôn lấp, chiếm khoảng 76% tổng số cơ sở xử lý chất thải. Trong khi đó, số lượng cơ sở đốt chất thải phát điện, cơ sở sản xuất phân compost và các cơ sở xử lý bằng công nghệ hiện đại còn chiếm tỷ lệ khiêm tốn. Điều này cho thấy chôn lấp vẫn đang giữ vai trò chủ đạo trong hệ thống xử lý CTRSH tại Việt Nam (Bảng 1).

Bảng 1. Số lượng cơ sở xử lý CTRSH theo loại hình công nghệ xử lý

Công nghệ xử lý	Số cơ sở	Tỷ lệ (%)
Chôn lấp	1.178	76,00
Đốt phát điện	10	0,65
Đốt không phát điện	333	21,48
Sản xuất mùn/phân hữu cơ	29	1,50
Tổng số	**1.550**	**100,0%**

Tỷ lệ bãi chôn lấp hợp vệ sinh đã được cải thiện trong những năm gần đây nhưng vẫn còn thấp so với yêu cầu quản lý môi trường. Tính đến tháng 12/2025, cả nước có khoảng 491 bãi chôn lấp hợp vệ sinh, chiếm 41,7% tổng số bãi chôn lấp; trong khi đó còn khoảng 687 bãi chôn lấp không hợp vệ sinh, chiếm 58,3%. Phần lớn các bãi chôn lấp không hợp vệ sinh tập trung tại khu vực nông thôn, miền núi hoặc các địa phương có nguồn lực đầu tư còn hạn chế [4].

Xét theo quy mô công suất, hệ thống bãi chôn lấp của Việt Nam chủ yếu là các bãi chôn lấp quy mô nhỏ. Trong tổng số 1.178 bãi chôn lấp hiện có, chỉ có 05 bãi có công suất thiết kế trên 1.000 tấn/ngày; 10 bãi có công suất từ 500 đến 1.000 tấn/ngày; còn lại hơn 98% số bãi chôn lấp có công suất dưới 500 tấn/ngày [5]. Điều này phản ánh thực trạng hệ thống xử lý chất thải còn phân tán, manh mún và chưa hình thành đầy đủ các khu xử lý tập trung quy mô lớn theo định hướng quy hoạch (Bảng 2).

Bảng 2. Quy mô các cơ sở xử lý CTRSH bằng hình thức chôn lấp

Công suất thiết kế	Số cơ sở	Tỷ lệ (%)
1.000 tấn/ngày	05	0,42
500 - 1.000 tấn/ngày	10	0,85
≤ 500 tấn/ngày	1.163	98,73
Tổng số	**1.178**	**100.00**

Các bãi chôn lấp quy mô lớn chủ yếu tập trung tại các đô thị đặc biệt và đô thị lớn như Hà Nội, TP.HCM, Đà Nẵng và Đồng Nai. Một số khu xử lý chất thải lớn đã được đầu tư tương đối đồng bộ về hạ tầng kỹ thuật, bao gồm hệ thống chống thấm đáy, thu gom và xử lý nước rỉ rác, thu gom khí phát sinh và quan trắc môi trường. Tuy nhiên, tại nhiều địa phương, đặc biệt là khu vực nông thôn và miền núi, các bãi chôn lấp vẫn được vận hành với điều kiện hạ tầng kỹ thuật còn hạn chế, chưa đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về bảo vệ môi trường.

Nhìn chung, hệ thống bãi chôn lấp CTRSH hiện nay vẫn đóng vai trò quan trọng trong bảo đảm năng lực xử lý chất thải của cả nước. Tuy nhiên, cơ cấu phân bố, quy mô đầu tư và chất lượng hạ tầng kỹ thuật giữa các địa phương còn có sự chênh lệch lớn, đặt ra nhiều yêu cầu đối với công tác quản lý trong thời gian tới.

3.1.2. Các vấn đề môi trường của bãi chôn lấp

Mặc dù đã có nhiều cải thiện trong công tác đầu tư và quản lý, hoạt động của các bãi chôn lấp CTRSH hiện nay vẫn phát sinh nhiều vấn đề môi trường đáng quan tâm. Cụ thể như sau:

Tình trạng ô nhiễm do nước rỉ rác vẫn là vấn đề nổi cộm tại nhiều bãi chôn lấp. Nước rỉ rác thường có hàm lượng chất hữu cơ, nitơ, kim loại và các chất ô nhiễm khác ở mức cao [7, 8]. Tại nhiều bãi chôn lấp quy mô nhỏ hoặc đã hoạt động trong thời gian dài, hệ thống thu gom và xử lý nước rỉ rác chưa đáp ứng yêu cầu, dẫn đến nguy cơ thấm xuống nước dưới đất hoặc phát tán ra môi trường xung quanh.

Phát thải khí bãi chôn lấp, đặc biệt là khí metan (CH_4), đang trở thành vấn đề môi trường quan trọng. Khí metan được hình thành từ quá trình phân hủy chất hữu cơ trong điều kiện yếm khí và có khả năng gây hiệu ứng nhà kính cao hơn 28 - 30 lần so với khí CO_2 [6]. Tuy nhiên, hiện nay chỉ một số ít bãi chôn lấp quy mô lớn được đầu tư hệ thống thu gom và tận dụng khí phát sinh; phần lớn khí bãi chôn lấp vẫn phát tán trực tiếp ra môi trường.

Tình trạng quá tải và kéo dài thời gian vận hành đang diễn ra tại nhiều bãi chôn lấp. Do khó khăn trong việc tìm kiếm địa điểm xây dựng khu xử lý mới và tốc độ gia tăng chất thải nhanh hơn dự báo, nhiều bãi chôn lấp đã hoặc đang tiệm cận công suất thiết kế. Điều này làm gia tăng nguy cơ phát sinh sự cố môi trường, cháy âm, phát tán mùi hôi và ảnh hưởng đến cộng đồng dân cư xung quanh.

Công tác đóng cửa, cải tạo và phục hồi môi trường sau khi kết thúc hoạt động còn nhiều bất cập. Nhiều bãi chôn lấp không hợp vệ sinh hoặc bãi đã ngừng tiếp nhận chất thải chưa được xử lý triệt để, tiếp tục phát sinh nước rỉ rác, khí thải và các tác động tiêu cực đến môi trường.

Bên cạnh các vấn đề kỹ thuật, công tác quản lý vận hành tại nhiều địa phương vẫn còn hạn chế. Một số bãi chôn lấp chưa thực hiện đầy đủ các yêu cầu về quan trắc môi trường, kiểm soát chất thải đầu vào, phủ đất hằng ngày hoặc quản lý dữ liệu vận hành. Nguồn lực tài chính và nhân lực phục vụ quản lý, vận hành và giám sát môi trường còn thiếu, đặc biệt tại các địa phương có điều kiện kinh tế khó khăn.

Những tồn tại nêu trên cho thấy mặc dù hệ thống bãi chôn lấp đã góp phần giải quyết nhu cầu xử lý CTRSH trong nhiều năm qua, song hiệu quả quản lý môi trường vẫn chưa đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững và các mục tiêu bảo vệ môi trường trong giai đoạn mới.

3.1.3. Thách thức trong bối cảnh kinh tế tuần hoàn

Bên cạnh các vấn đề tồn tại hiện nay, công tác quản lý bãi chôn lấp CTRSH đang phải đối mặt với nhiều thách thức mới xuất phát từ quá trình chuyển đổi mô hình quản lý chất thải và các cam kết quốc tế về môi trường của Việt Nam.

Trước hết, việc triển khai phân loại CTRSH tại nguồn theo quy định của Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 và các văn bản hướng dẫn thực thi luật sẽ làm thay đổi đáng kể thành phần và khối lượng chất thải đưa vào chôn lấp [1, 2, 3]. Trong tương lai, bãi chôn lấp không còn là nơi tiếp nhận toàn bộ CTRSH phát sinh mà chủ yếu tiếp nhận phần chất thải còn lại sau tái sử dụng, tái chế và thu hồi năng lượng. Điều này đòi hỏi phải điều chỉnh quy hoạch, công nghệ và phương thức quản lý các bãi chôn lấp theo hướng phù hợp với mô hình kinh tế tuần hoàn.

Thứ hai, mục tiêu giảm dần tỷ lệ chôn lấp đặt ra áp lực lớn đối với các địa phương trong việc đầu tư các công nghệ xử lý thay thế. Trong khi nhiều địa phương vẫn đang phụ thuộc chủ yếu vào chôn lấp, việc chuyển đổi sang các mô hình xử lý hiện đại cần nguồn lực tài chính lớn, quỹ đất phù hợp và năng lực quản lý đồng bộ.

Thứ ba, yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính và thực hiện cam kết phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050 đang tạo ra những yêu cầu mới đối với hoạt động quản lý bãi chôn lấp. Các địa phương và đơn vị vận hành sẽ phải từng bước thực hiện kiểm kê phát thải khí nhà kính, tăng cường thu gom khí metan, áp dụng các giải pháp giảm phát thải và xây dựng hệ thống theo dõi, báo cáo, thẩm định phát thải theo quy định.

Thứ tư, xu hướng chuyển đổi số trong lĩnh vực môi trường đòi hỏi nâng cao năng lực quản lý và giám sát bãi chôn lấp dựa trên dữ liệu. Việc xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia, kết nối dữ liệu quan trắc môi trường, ứng dụng công nghệ số trong quản lý vận hành và giám sát phát thải sẽ là yêu cầu tất yếu trong thời gian tới.

Cuối cùng, áp lực từ cộng đồng dân cư đối với các cơ sở xử lý chất thải ngày càng gia tăng. Việc lựa chọn địa điểm xây dựng các bãi chôn lấp mới hoặc mở rộng các bãi chôn lấp hiện hữu đang gặp nhiều khó khăn do yêu cầu bảo đảm khoảng cách an toàn môi trường và sự đồng thuận của cộng đồng. Đây sẽ tiếp tục là một trong những thách thức lớn đối với công tác quy hoạch và phát triển hạ tầng xử lý chất thải trong tương lai.

Những thách thức nêu trên cho thấy công tác quản lý bãi chôn lấp CTRSH tại Việt Nam đang đứng trước yêu cầu chuyển đổi mạnh mẽ từ mô hình quản lý truyền thống sang mô hình quản lý hiện đại, gắn với kinh tế tuần hoàn, chuyển đổi số và mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính. Đây vừa là áp lực, vừa là cơ hội để nâng cao hiệu quả quản lý chất thải và phát triển ngành môi trường theo hướng bền vững.

3.2. Tồn tại, hạn chế và nguyên nhân

3.2.1. Tồn tại, hạn chế

Mặc dù hệ thống chính sách, pháp luật về quản lý CTRSH đã từng bước được hoàn thiện và nhiều địa phương đã quan tâm đầu tư hạ tầng xử lý chất thải, công tác quản lý bãi chôn lấp CTRSH tại Việt Nam vẫn còn tồn tại, hạn chế, chưa đáp ứng yêu cầu bảo vệ môi trường và phát triển bền vững trong giai đoạn hiện nay.

Hệ thống bãi chôn lấp còn phân tán, tỷ lệ bãi chôn lấp không hợp vệ sinh còn cao

Hiện nay, phần lớn các bãi chôn lấp CTRSH tại Việt Nam có quy mô nhỏ, phân tán theo địa bàn hành chính cấp xã. Nhiều bãi chôn lấp được xây dựng từ giai đoạn trước khi hệ thống quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật được hoàn thiện nên chưa đáp ứng các yêu cầu về chống thấm, thu gom nước rỉ rác, thu gom khí phát sinh và quan trắc môi trường.

Mặc dù tỷ lệ bãi chôn lấp hợp vệ sinh đã tăng trong những năm gần đây, song số lượng bãi chôn lấp không hợp vệ sinh vẫn còn chiếm tỷ lệ lớn. Nhiều bãi chôn lấp đã quá tải, xuống cấp hoặc không còn phù hợp với yêu cầu quản lý môi trường nhưng chưa được cải tạo, nâng cấp hoặc đóng cửa theo quy định.

Công nghệ xử lý và hạ tầng kỹ thuật chưa đồng bộ

Tại nhiều địa phương, hoạt động chôn lấp vẫn chủ yếu tiếp nhận chất thải chưa được phân loại hoặc chưa qua xử lý sơ bộ. Điều này làm gia tăng lượng nước rỉ rác phát sinh, rút ngắn tuổi thọ bãi chôn lấp và làm tăng nguy cơ phát sinh ô nhiễm môi trường.

Hệ thống xử lý nước rỉ rác tại nhiều bãi chôn lấp còn hạn chế về công nghệ và hiệu quả vận hành. Một số công trình xử lý được đầu tư từ nhiều năm trước không còn đáp ứng yêu cầu xử lý đối với nước rỉ rác có tải lượng ô nhiễm cao hoặc thành phần ô nhiễm phức tạp.

Bên cạnh đó, việc đầu tư hệ thống thu gom và tận dụng khí bãi chôn lấp còn rất hạn chế. Phần lớn các bãi chôn lấp hiện nay chưa có hệ thống thu hồi khí metan hoặc chỉ thực hiện đốt bỏ đơn giản, chưa tận dụng được nguồn năng lượng tiềm năng từ khí bãi chôn lấp.

Công tác quản lý, vận hành và giám sát môi trường còn bất cập

Tại một số địa phương, việc vận hành bãi chôn lấp chưa thực hiện đầy đủ các yêu cầu kỹ thuật theo quy định. Tình trạng không phủ đất hằng ngày, phân ô chôn lấp chưa hợp lý, quản lý nước mưa và nước rỉ rác chưa hiệu quả vẫn còn xảy ra.

Hoạt động quan trắc môi trường tại nhiều bãi chôn lấp chưa được thực hiện thường xuyên hoặc chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu về nội dung và tần suất quan trắc. Việc ứng dụng công nghệ số, tự động hóa và quản lý dữ liệu môi trường còn hạn chế, dẫn đến khó khăn trong công tác giám sát, cảnh báo và xử lý kịp thời các nguy cơ ô nhiễm.

Công tác đóng cửa, cải tạo và phục hồi môi trường đối với các bãi chôn lấp đã kết thúc hoạt động còn chậm, trong khi đây là giai đoạn tiềm ẩn nhiều nguy cơ phát sinh ô nhiễm kéo dài nếu không được quản lý phù hợp.

Nguồn lực tài chính và cơ chế đầu tư chưa đáp ứng yêu cầu

Quản lý bãi chôn lấp hợp vệ sinh đòi hỏi nguồn kinh phí lớn cho đầu tư xây dựng, vận hành, quan trắc môi trường, xử lý nước rỉ rác, thu gom khí phát sinh và phục hồi môi trường sau đóng bãi. Tuy nhiên, khả năng cân đối ngân sách của nhiều địa phương còn hạn chế, đặc biệt tại khu vực miền núi, vùng sâu, vùng xa.

Cơ chế giá dịch vụ thu gom, vận chuyển và xử lý CTRSH tại nhiều địa phương chưa phản ánh đầy đủ chi phí thực tế. Việc xã hội hóa đầu tư trong lĩnh vực xử lý chất thải còn gặp nhiều khó khăn do thời gian hoàn vốn dài, hiệu quả tài chính thấp và mức độ rủi ro đầu tư cao.

Chưa đáp ứng yêu cầu quản lý chất thải trong bối cảnh mới

Trong bối cảnh triển khai phân loại CTRSH tại nguồn, phát triển kinh tế tuần hoàn và thực hiện các cam kết giảm phát thải khí nhà kính, nhiều bãi chôn lấp hiện nay chưa đáp ứng các yêu cầu mới về giảm tỷ lệ chôn lấp, kiểm kê phát thải khí nhà kính, thu gom khí metan và quản lý phát thải theo hướng phát triển carbon thấp.

Việc tích hợp các mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính, chuyển đổi số và kinh tế tuần hoàn vào công tác quản lý bãi chôn lấp còn ở giai đoạn đầu, chưa tạo được sự chuyển biến rõ nét trong thực tiễn.

3.2.2. Nguyên nhân

Những tồn tại, hạn chế nêu trên xuất phát từ nhiều nguyên nhân khác nhau, bao gồm cả nguyên nhân khách quan và chủ quan.

Nhận thức và sự quan tâm của một số địa phương chưa tương xứng với yêu cầu thực tiễn

Tại một số địa phương, công tác quản lý CTRSH và quản lý bãi chôn lấp chưa thực sự được xác định là nhiệm vụ ưu tiên trong phát triển kinh tế - xã hội. Việc đầu tư cho hạ tầng xử lý chất thải nhiều khi mới tập trung giải quyết nhu cầu trước mắt, chưa chú trọng đúng mức đến các yêu cầu về bảo vệ môi trường lâu dài, phục hồi môi trường sau đóng bãi và giảm phát thải khí nhà kính.

Hệ thống bãi chôn lấp được hình thành từ nhiều giai đoạn khác nhau

Nhiều bãi chôn lấp hiện nay được xây dựng từ thời kỳ hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật về môi trường chưa hoàn thiện hoặc chưa được áp dụng đầy đủ. Do đó, nhiều công trình không đáp ứng yêu cầu kỹ thuật hiện hành và cần nguồn kinh phí rất lớn để cải tạo, nâng cấp hoặc xử lý triệt để.

Khó khăn trong công tác quy hoạch và bố trí quỹ đất

Việc lựa chọn địa điểm xây dựng các khu xử lý chất thải tập trung và bãi chôn lấp mới gặp nhiều khó khăn do quỹ đất phù hợp ngày càng hạn chế, yêu cầu bảo đảm khoảng cách an toàn môi trường ngày càng cao và sự phản đối của cộng đồng dân cư theo tâm lý "không muốn cơ sở xử lý chất thải gần nơi sinh sống".

Điều này dẫn đến tình trạng nhiều bãi chôn lấp phải kéo dài thời gian hoạt động hoặc mở rộng quy mô trong khi hạ tầng kỹ thuật không còn đáp ứng yêu cầu.

Phân loại chất thải tại nguồn triển khai còn chậm

Mặc dù Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 đã quy định phân loại CTRSH tại nguồn là yêu cầu bắt buộc, song việc triển khai trên thực tế còn chậm và chưa đồng bộ. Hệ thống thu gom, vận chuyển và cơ sở xử lý tại nhiều địa phương chưa được tổ chức phù hợp để tiếp nhận riêng từng dòng chất thải sau phân loại.

Điều này làm cho lượng chất thải phải đưa đi chôn lấp vẫn ở mức cao, gây áp lực lớn đối với các bãi chôn lấp hiện hữu và làm giảm hiệu quả sử dụng tài nguyên thứ cấp từ chất thải.

Hạn chế về nguồn lực tài chính, khoa học công nghệ và nhân lực

Chi phí đầu tư các công nghệ xử lý chất thải hiện đại, hệ thống xử lý nước rỉ rác, thu hồi khí metan và quan trắc môi trường tự động còn rất lớn, trong khi khả năng huy động nguồn lực của nhiều địa phương còn hạn chế.

Bên cạnh đó, đội ngũ cán bộ quản lý và kỹ thuật tại một số địa phương còn thiếu về số lượng và hạn chế về chuyên môn. Công tác nghiên cứu, chuyển giao công nghệ, ứng dụng chuyển đổi số và các giải pháp giảm phát thải trong lĩnh vực quản lý bãi chôn lấp chưa theo kịp yêu cầu thực tiễn.

Cơ chế, chính sách hỗ trợ chuyển đổi còn chưa đầy đủ

Mặc dù hệ thống pháp luật đã từng bước hoàn thiện, song các cơ chế khuyến khích đầu tư vào xử lý chất thải, thu hồi năng lượng từ khí bãi chôn lấp, giảm phát thải khí nhà kính và tham gia thị trường carbon còn đang trong quá trình hoàn thiện. Điều này ảnh hưởng đến khả năng huy động nguồn lực xã hội và thu hút doanh nghiệp tham gia đầu tư nâng cấp các bãi chôn lấp theo hướng hiện đại, thân thiện với môi trường.

Nhìn chung, các tồn tại, hạn chế trong quản lý bãi chôn lấp CTRSH hiện nay không chỉ xuất phát từ vấn đề kỹ thuật hay nguồn lực đầu tư mà còn liên quan đến quá trình chuyển đổi mô hình quản lý chất thải. Do đó, việc nâng cao hiệu quả quản lý bãi chôn lấp trong thời gian tới cần được tiếp cận theo hướng tổng thể, đồng bộ và gắn với các mục tiêu phát triển kinh tế tuần hoàn, chuyển đổi số và giảm phát thải khí nhà kính.

3.3. Giải pháp và kiến nghị nâng cao hiệu quả quản lý bãi chôn lấp CTRSH

3.3.1. Hoàn thiện thể chế, chính sách

Tiếp tục hoàn thiện hệ thống chính sách, pháp luật về quản lý CTRSH theo hướng đồng bộ với các mục tiêu phát triển kinh tế tuần hoàn, tăng trưởng xanh và giảm phát thải khí nhà kính.

Rà soát, sửa đổi, bổ sung các quy định liên quan đến quy hoạch, đầu tư xây dựng, vận hành, đóng cửa và phục hồi môi trường đối với bãi chôn lấp CTRSH; bảo đảm thống nhất giữa các quy định về bảo vệ môi trường, quy hoạch xây dựng, quản lý đất đai và ứng phó với biến đổi khí hậu.

Hoàn thiện các quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật về thiết kế, xây dựng, vận hành và đóng cửa bãi chôn lấp theo hướng tiệm cận với các tiêu chuẩn tiên tiến trong khu vực và trên thế giới; tăng cường các yêu cầu về chống thấm, xử lý nước rỉ rác, thu gom khí phát sinh, quan trắc môi trường và kiểm soát phát thải khí nhà kính.

Đẩy nhanh lộ trình triển khai phân loại CTRSH tại nguồn; tổ chức đồng bộ hệ thống thu gom, vận chuyển và xử lý chất thải sau phân loại nhằm giảm dần lượng chất thải phải chôn lấp, nâng cao tỷ lệ tái chế, tái sử dụng và thu hồi năng lượng.

Từng bước xây dựng cơ chế quản lý phát thải khí nhà kính đối với các bãi chôn lấp CTRSH; nghiên cứu hoàn thiện các quy định về kiểm kê phát thải, hệ thống đo đạc, báo cáo và thẩm định, tạo cơ sở cho việc tham gia thị trường carbon trong tương lai.

3.3.2. Nâng cấp hạ tầng và công nghệ xử lý

Các địa phương cần rà soát, đánh giá toàn diện hiện trạng các bãi chôn lấp CTRSH trên địa bàn; xây dựng lộ trình cải tạo, nâng cấp hoặc đóng cửa đối với các bãi chôn lấp không hợp vệ sinh, các bãi chôn lấp quá tải hoặc có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường cao.

Ưu tiên đầu tư nâng cấp hệ thống chống thấm đáy và thành bãi, hệ thống thu gom và xử lý nước rỉ rác, hệ thống thu gom nước mưa riêng biệt và các công trình kiểm soát ô nhiễm môi trường khác đối với các bãi chôn lấp đang hoạt động.

Đối với các bãi chôn lấp đã kết thúc hoạt động hoặc không còn phù hợp với quy hoạch, cần thực hiện đóng cửa theo đúng quy trình kỹ thuật; đồng thời triển khai các chương trình phục hồi môi trường, cải tạo cảnh quan và chuyển đổi mục đích sử dụng đất theo hướng phù hợp với điều kiện thực tế của địa phương.

Đẩy mạnh phát triển các khu liên hợp xử lý chất thải tập trung theo hướng tích hợp nhiều công nghệ như phân loại, tái chế, sản xuất phân compost, đốt chất thải thu hồi năng lượng và chôn lấp phần chất thải còn lại. Từng bước giảm tỷ lệ chôn lấp trực tiếp, phù hợp với định hướng phát triển kinh tế tuần hoàn và các mục tiêu bảo vệ môi trường quốc gia.

Khuyến khích nghiên cứu, chuyển giao và ứng dụng các công nghệ xử lý nước rỉ rác tiên tiến, công nghệ ổn định hóa chất thải trước khi chôn lấp và các giải pháp kỹ thuật nhằm kéo dài tuổi thọ bãi chôn lấp và giảm thiểu tác động môi trường.

3.3.3. Thu gom và sử dụng khí metan

Tăng cường đầu tư hệ thống giếng thu khí và mạng lưới thu gom khí bãi chôn lấp đối với các bãi chôn lấp đang hoạt động, đặc biệt là các bãi có quy mô lớn và có tiềm năng phát sinh khí metan cao.

Khuyến khích triển khai các dự án thu hồi khí metan để phát điện, sản xuất nhiệt năng hoặc sử dụng làm nhiên liệu phục vụ sản xuất. Việc tận dụng khí bãi chôn lấp không chỉ góp phần giảm phát thải khí nhà kính mà còn tạo nguồn thu hỗ trợ hoạt động quản lý và vận hành bãi chôn lấp.

Từng bước thực hiện kiểm kê phát thải khí nhà kính đối với các bãi chôn lấp CTRSH; xây dựng cơ sở dữ liệu về phát thải khí metan phục vụ công tác quản lý, theo dõi và đánh giá hiệu quả các giải pháp giảm phát thải.

Nghiên cứu lồng ghép các dự án thu hồi khí metan từ bãi chôn lấp vào các chương trình giảm phát thải khí nhà kính, tín chỉ carbon và các cơ chế tài chính khí hậu quốc tế nhằm huy động thêm nguồn lực đầu tư cho lĩnh vực này.

3.3.4. Chuyển đổi số trong quản lý bãi chôn lấp

Đẩy mạnh ứng dụng công nghệ số trong quản lý, vận hành và giám sát môi trường đối với các bãi chôn lấp CTRSH.

Xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia về bãi chôn lấp CTRSH, bao gồm các thông tin về vị trí, quy mô, công suất, hiện trạng hoạt động, mức độ ô nhiễm, tình trạng đóng cửa và phục hồi môi trường. Bảo đảm kết nối, chia sẻ dữ liệu giữa cơ quan quản lý nhà nước ở trung ương và địa phương.

Từng bước triển khai hệ thống quan trắc môi trường tự động, liên tục đối với các bãi chôn lấp quy mô lớn; kết nối dữ liệu quan trắc với cơ quan quản lý nhà nước để phục vụ công tác giám sát và cảnh báo sớm nguy cơ ô nhiễm môi trường.

Khuyến khích áp dụng các giải pháp quản lý vận hành thông minh như hệ thống quản lý trực tuyến, cân điện tử tự động, camera giám sát, thiết bị bay không người lái (drone), công nghệ viễn thám và hệ thống thông tin địa lý (GIS) trong theo dõi hiện trạng bãi chôn lấp.

Đẩy mạnh số hóa hồ sơ môi trường, hồ sơ vận hành và dữ liệu phát thải nhằm nâng cao tính minh bạch, hiệu quả quản lý và khả năng giám sát của cơ quan quản lý nhà nước cũng như cộng đồng.

3.3.5. Huy động nguồn lực tài chính

Hoàn thiện cơ chế tài chính trong lĩnh vực quản lý CTRSH theo hướng bảo đảm tính đúng, tính đủ chi phí thu gom, vận chuyển và xử lý chất thải; từng bước thực hiện cơ chế thu giá dịch vụ xử lý CTRSH theo khối lượng hoặc thể tích chất thải phát sinh theo quy định của pháp luật.

Khuyến khích các hình thức xã hội hóa, hợp tác công tư (PPP) và các mô hình đầu tư xanh trong lĩnh vực xử lý chất thải; tạo điều kiện thuận lợi cho doanh nghiệp tham gia đầu tư xây dựng, nâng cấp và vận hành các công trình xử lý chất thải hiện đại.

Tăng cường huy động các nguồn vốn quốc tế như vốn ODA, Quỹ Khí hậu xanh (GCF), Quỹ Môi trường toàn cầu (GEF), các quỹ khí hậu và nguồn tài chính carbon để hỗ trợ các dự án cải tạo bãi chôn lấp, xử lý nước rỉ rác, thu hồi khí metan và giảm phát thải khí nhà kính.

Nghiên cứu xây dựng cơ chế tài chính dài hạn phục vụ công tác đóng cửa, cải tạo và phục hồi môi trường các bãi chôn lấp sau khi kết thúc hoạt động nhằm bảo đảm quản lý môi trường bền vững.

4. KẾT LUẬN

Bãi chôn lấp CTRSH vẫn giữ vai trò cần thiết trong hệ thống quản lý chất thải của Việt Nam nhưng đang bộc lộ nhiều hạn chế về hạ tầng, công nghệ và kiểm soát ô nhiễm. Tỷ lệ bãi chôn lấp không hợp vệ sinh còn cao, xử lý nước rỉ rác, thu gom khí và phục hồi môi trường sau đóng bãi chưa đáp ứng yêu cầu. Phương thức chôn lấp cũng góp phần làm gia tăng phát thải khí nhà kính, đặc biệt là khí metan. Trong thời gian tới, cần hoàn thiện thể chế, nâng cấp hạ tầng và công nghệ, tăng cường thu gom, tận dụng khí metan và đẩy mạnh chuyển đổi số. Đồng thời, cần hoàn thiện cơ chế tài chính, huy động nguồn lực xã hội hóa và tăng cường trách nhiệm của các bên liên quan. Việc phân loại CTRSH tại nguồn, tái sử dụng, tái chế và thu hồi năng lượng cần được đẩy mạnh nhằm giảm lượng chất thải phải chôn lấp. Về lâu dài, chôn lấp cần chuyển từ phương thức xử lý chủ đạo sang tiếp nhận phần chất thải còn lại sau phân loại và thu hồi tài nguyên. Qua đó, góp phần kiểm soát ô nhiễm, giảm phát thải khí nhà kính và thực hiện mục tiêu phát triển bền vững, kinh tế tuần hoàn và phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14, ngày 17/11/2020, có hiệu lực từ ngày 01/01/2022.

[2] Chính phủ. Nghị định số 08/2022/NĐ-CP ngày 10/01/2022 quy định chi tiết một số điều của Luật Bảo vệ môi trường, 2022.

[3] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Thông tư số 02/2022/TT-BTNMT ngày 10/01/2022 quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Bảo vệ môi trường, 2022.

[4] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Báo cáo công tác bảo vệ môi trường trên phạm vi cả nước năm 2025, 2026.

[5] Dương Thị Thanh Xuyến và cộng sự. Quản lý chất thải rắn sinh hoạt: Từ lý luận đến thực tiễn. NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2026.

[6] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.

[7] ISWA. A Roadmap for Closing Waste Management Gaps. International Solid Waste Association, 2016.

[8] ISWA. Regional Brief: Waste Management Challenges and Opportunities in Southeast Asia. International Solid Waste Association, 2025.

■Ngày nhận bài: 04/9/2026 ■Ngày sửa bài: 16/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/9/2026

Đánh giá ảnh hưởng của nghẽn dòng đến các yếu tố phơi lộ ô nhiễm tại sông suối miền núi phía Bắc Việt Nam: Khung sàng lọc rủi ro theo quy mô đoạn suối

Effects of headwater channel blockage on pollution exposure in river basins of the Northern Mountainous region of Vietnam: A Framework for reach scale risk screening

> THS TẠ HỒNG ÁNH[1], PGS.TS VŨ THỊ PHƯƠNG THẢO[2], PGS.TS NGHIÊM VÂN KHANH[1,*]
[1]Khoa Hạ tầng Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Khoa Môi trường, Trường đại học Mỏ - Địa chất
[*]Email:khanhnv@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Trong các lưu vực sông vùng núi phía Bắc Việt Nam, địa hình dốc, mưa cực đoan, sự dịch chuyển vật liệu trên sườn và các nguồn phát thải phân tán có thể làm gia tăng các tác động bất lợi đến chế độ dòng chảy và chất lượng nước. Khi khối vật liệu hình thành trạng thái nghẽn, sự thay đổi về điều kiện thủy động lực có thể chi phối độ ổn định của khối tích tụ, đồng thời ảnh hưởng đến quá trình giữ lại, biến đổi và phát tán các chất gây suy giảm chất lượng nước. Bài báo tổng hợp các nghiên cứu trong nước và quốc tế, kế thừa cách tiếp cận theo đoạn suối và đề xuất khung đánh giá chỉ số phơi lộ ô nhiễm do nghẽn lòng dẫn (BPEI - Blockage-Pollution Exposure Index) gồm bốn hợp phần: BI - nguy cơ nghẽn dòng, PSI - tiềm năng nguồn ô nhiễm, HMI - mức biến đổi thủy động lực - sinh địa hóa, ERI - đối tượng môi trường phơi lộ. Phân tích cơ chế cho thấy hai trạng thái cần phân biệt: (i) khối nghẽn ổn định có thể tạo vùng nước dâng, giảm vận tốc, tăng lắng hạt mịn và lưu giữ tạm thời các chất gắn với trầm tích; (ii) xói hoặc phá vỡ khối nghẽn có thể tạo xung lưu lượng, trầm tích và chất ô nhiễm về hạ lưu. Khung nghiên cứu đề xuất hệ chỉ tiêu, quy trình chuẩn hóa, xác định trọng số, thiết kế quan trắc S0-S4, kiểm chứng và ma trận ưu tiên quản lý. BPEI được định hướng như công cụ phương pháp luận, cần tiếp tục hiệu chỉnh và kiểm định trước khi sử dụng để định lượng rủi ro.

Từ khóa: Nghẽn lòng dẫn; trượt lở; dòng bùn đá; phơi lộ ô nhiễm; chất lượng nước; trầm tích; BPEI.

ABSTRACT

In the river basins of northern mountainous Vietnam, steep terrain, extreme rainfall, hillslope material movement, and diffuse pollution sources may intensify adverse impacts on flow regimes and environmental quality. When accumulated materials form a blockage, changes in hydrodynamic conditions may influence the stability of the accumulated mass while also affecting the retention, transformation, and release of substances that degrade water quality. This paper synthesizes domestic and international studies, builds on the reach-scale approach, and proposes a Blockage-Pollution Exposure Index (BPEI) framework comprising four components: BI - blockage risk; PSI - pollution source potential; HMI - hydrodynamic–biogeochemical modification; and ERI - environmental receptors exposed. Mechanistic analysis distinguishes two states: (i) a stable blockage may create upstream water-level rise, reduce flow velocity, increase fine-particle deposition, and temporarily retain sediment-associated contaminants; whereas (ii) erosion or failure of the blockage may generate pulses of discharge, sediment, and pollutants transported downstream. The proposed framework includes an indicator system, normalization and weighting procedures, an S0-S4 monitoring design, validation, and a management-prioritization matrix. BPEI is intended as a methodological framework that requires further refinement and validation before being applied for quantitative risk assessment.

Keywords: Headwater channel occlusion; landslides; debris flows; pollution exposure; water quality; sediment-associated pollutants; BPEI framework.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ở các lưu vực miền núi, trượt lở đất đá và dòng bùn đá có thể đưa một lượng lớn vật liệu từ sườn dốc vào mạng lưới sông suối. Tại những đoạn thung lũng hẹp, hợp lưu, đoạn uốn cong hoặc nơi tiết diện lòng dẫn bị thu hẹp, vật liệu có thể chiếm một phần hoặc toàn bộ tiết diện, tạo khối nghẽn hoặc đập chắn tự nhiên. Costa và Schuster [1] cho thấy đập tự nhiên có cơ chế hình thành, thời gian tồn tại và phương thức phá vỡ rất đa dạng; các nghiên cứu sau đó tiếp tục làm rõ vai trò của tương quan giữa quy mô khối vật liệu, hình học thung lũng và chế độ dòng chảy [2 - 5]. Vì vậy, nhạy cảm trượt lở không thể đồng nhất với nguy cơ nghẽn dòng: vật liệu phải có khả năng di chuyển tới lòng dẫn và tích tụ với quy mô đủ lớn tại một vị trí hình thái thuận lợi. Ở Việt Nam, nhiều nghiên cứu tại vùng núi phía Bắc đã ứng dụng GIS, AHP, tỷ số tần suất, học máy và Flow-R để phân vùng trượt lở, dòng bùn đá và lũ quét [6 - 8]. Các công trình này tạo nền dữ liệu quan trọng về địa hình, địa chất, mưa, lớp phủ và đường dịch chuyển vật liệu. Tuy nhiên, mục tiêu chủ yếu vẫn là xác định nơi phát sinh tai biến hoặc vùng lan truyền, chưa trực tiếp trả lời ba câu hỏi môi trường: đoạn suối nào có khả năng bị nghẽn; nghẽn dòng làm thay đổi quá trình vận chuyển - lưu giữ chất ô nhiễm ra sao; và đối tượng nào nằm trong không gian có thể chịu tác động.

Khoảng trống này có ý nghĩa thực tiễn vì nghẽn dòng đồng thời làm thay đổi thủy lực và môi trường phản ứng. Khi vận tốc giảm và thời gian lưu tăng, hạt mịn cùng các chất ô nhiễm gắn hạt có thể lắng và tích tụ; khi DO, pH hoặc thế oxy hóa - khử thay đổi, một số nguyên tố có thể chuyển pha hoặc tăng tính linh động. Ngược lại, khi khối nghẽn bị xói hay phá vỡ, trầm tích tích tụ có thể được tái huy động thành xung tải lượng. Các nghiên cứu về hóa học nước sau trượt lở [9 - 10], tái huy động chất ô nhiễm trong lũ cực đoan [11] và kim loại trong trầm tích sông Hồng [12] cho thấy cần phân tích đồng thời nước, trầm tích và trạng thái thủy động lực thay vì chỉ dựa trên vị trí nguồn thải. Trên cơ sở đó, bài báo đặt ra ba câu hỏi nghiên cứu: (RQ1) những nhóm yếu tố nào quyết định chuyển tiếp từ phát sinh vật liệu sang nghẽn dòng và phơi lộ ô nhiễm; (RQ2) có thể lượng hóa mức ưu tiên theo đoạn suối bằng cách tích hợp nguy cơ nghẽn, nguồn ô nhiễm, biến đổi thủy động lực - sinh địa hóa và đối tượng tiếp nhận như thế nào; và (RQ3) thiết kế quan trắc nào cho phép kiểm chứng các quan hệ trên trong điều kiện dữ liệu miền núi còn hạn chế. Đóng góp của bài báo là xây dựng chuỗi cơ chế và khung BPEI theo đơn vị đoạn suối, đồng thời xác định rõ ranh giới giữa nguy cơ, phơi lộ và thiệt hại: BPEI là công cụ sàng lọc/ưu tiên, không thay thế mô hình thủy lực chi tiết hay đánh giá rủi ro tuyệt đối.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ KHOẢNG TRỐNG

2.1. Từ đập do trượt lở đến phân vùng nguy cơ nghẽn dòng

Các nghiên cứu quốc tế phát triển theo ba hướng chính. Thứ nhất là nghiên cứu cơ chế và hình thái đập do trượt lở. Costa và Schuster [1], Casagli và Ermini [2], Ermini và Casagli [3] và Dal Sasso và cộng sự [4] cho thấy khả năng chắn dòng phụ thuộc không chỉ vào thể tích khối trượt mà còn vào chiều rộng thung lũng, độ dốc, cấu trúc vật liệu và tương quan giữa lượng vật liệu với không gian dòng chảy. Thứ hai là nghiên cứu ổn định và phá vỡ, trong đó Fan và cộng sự [5] nhấn mạnh cần tách biệt khả năng hình thành đập với hành vi sau khi đập đã hình thành. Thứ ba là mở rộng từ sự kiện đơn lẻ sang phân vùng trên mạng lưới sông. Tacconi Stefanelli và cộng sự [13 - 14] sử dụng GIS và các chỉ tiêu hình thái để xác định đoạn sông có khả năng bị chặn trên quy mô lưu vực hoặc vùng rộng.

Điểm thống nhất của các hướng nghiên cứu trên là chuỗi nguồn - đường truyền - đối tượng tiếp nhận. Bản đồ nhạy cảm trượt lở chỉ mô tả nơi có khả năng phát sinh vật liệu để dự báo bít tắc còn phải mô tả mức độ kết nối giữa sườn dốc và lòng dẫn, quỹ đạo dịch chuyển của khối trượt và đặc điểm hình thái của đoạn suối tiếp nhận. Vì vậy, bài báo sử dụng đoạn suối làm đơn vị phân tích thay vì ô lưới bề mặt sườn dốc hoặc toàn tiểu lưu vực. Cách tiếp cận theo quy mô đoạn suối này cũng phù hợp với nhu cầu quản lý, vì vị trí quan trắc, điểm lấy nước, công trình cầu cống, đất canh tác và sinh cảnh đều có thể quy chiếu trực tiếp tới từng đoạn thuộc mạng lưới sông suối.

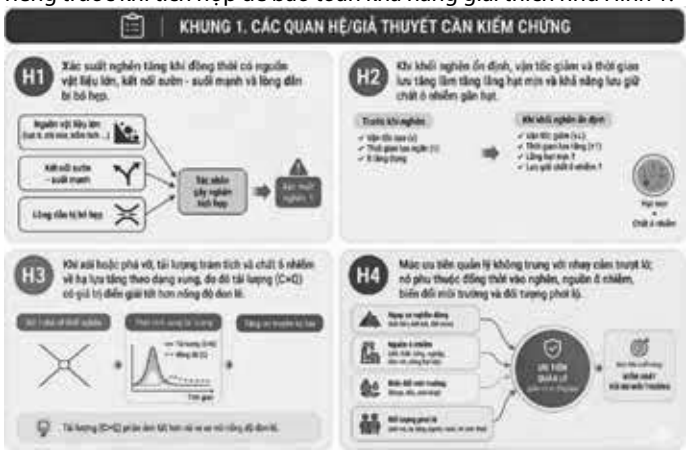
2.2. Chất lượng nước, trầm tích và phơi lộ môi trường

Nghẽn dòng làm thay đổi cấu trúc dòng theo không gian. Phía thượng lưu, mực nước và thời gian lưu có thể tăng trong khi vận tốc giảm; tại khối nghẽn xuất hiện thấm qua vật liệu, gradient thủy lực và xói cục bộ; phía hạ lưu có thể giảm tạm thời nguồn cấp nước và trầm tích nhưng chịu xung lưu lượng khi khối nghẽn bị phá vỡ. Các biến đổi này chi phối TSS, độ đục, DO, pH, ORP, chất hữu cơ, dinh dưỡng và các chất ô nhiễm gắn với hạt. Yoshihara và cộng sự [9] chứng minh trượt lở có thể làm thay đổi hóa học nước ở quy mô lưu vực thông qua tăng tương tác đất - nước. Hercolano và cộng sự [10] ghi nhận biến đổi điều kiện oxy hóa - khử và giải phóng một số nguyên tố sau trượt lở. Crawford và cộng sự [11] nhấn mạnh nguy cơ tái huy động chất ô nhiễm trong trầm tích khi xảy ra dòng chảy cực đoan. Nghiên cứu sông Hồng [12] cho thấy Cd, Cu, Pb và một số kim loại khác cần được xem xét trong pha trầm tích, đặc biệt ở những khu vực chịu tác động nhân sinh.

Trong tiếp cận rủi ro, phơi lộ phản ánh sự hiện diện của đối tượng tại nơi có thể chịu tác động, không đồng nghĩa với thiệt hại đã xảy ra [15]. Vì vậy, đánh giá môi trường liên quan nghẽn dòng cần tách ít nhất ba lớp thông tin: (i) khả năng hình thành nghẽn; (ii) khả năng làm thay đổi nồng độ/tải lượng hoặc điều kiện môi trường; và (iii) sự hiện diện của nguồn nước sử dụng, đất sản xuất, sinh cảnh hoặc dân cư/công trình trong vùng thượng - hạ lưu liên quan. Việc tích hợp sớm ba tầng thông tin này ở các bước đầu của mô hình có thể dẫn đến hiện tượng triệt tiêu lẫn nhau giữa các biến số và làm mất đi khả năng tường minh nguyên nhân cốt lõi.

2.3. Khoảng trống và các quan hệ cần kiểm chứng

Từ tổng quan có thể xác định khoảng trống chính không nằm ở việc thiếu một bản đồ trượt lở mới, mà ở việc thiếu cầu nối định lượng giữa quá trình địa mạo và phơi lộ môi trường. Khung nghiên cứu vì vậy phải trả lời đồng thời bốn lớp và các lớp này cần được tính riêng trước khi tích hợp để bảo toàn khả năng giải thích như Hình 1.

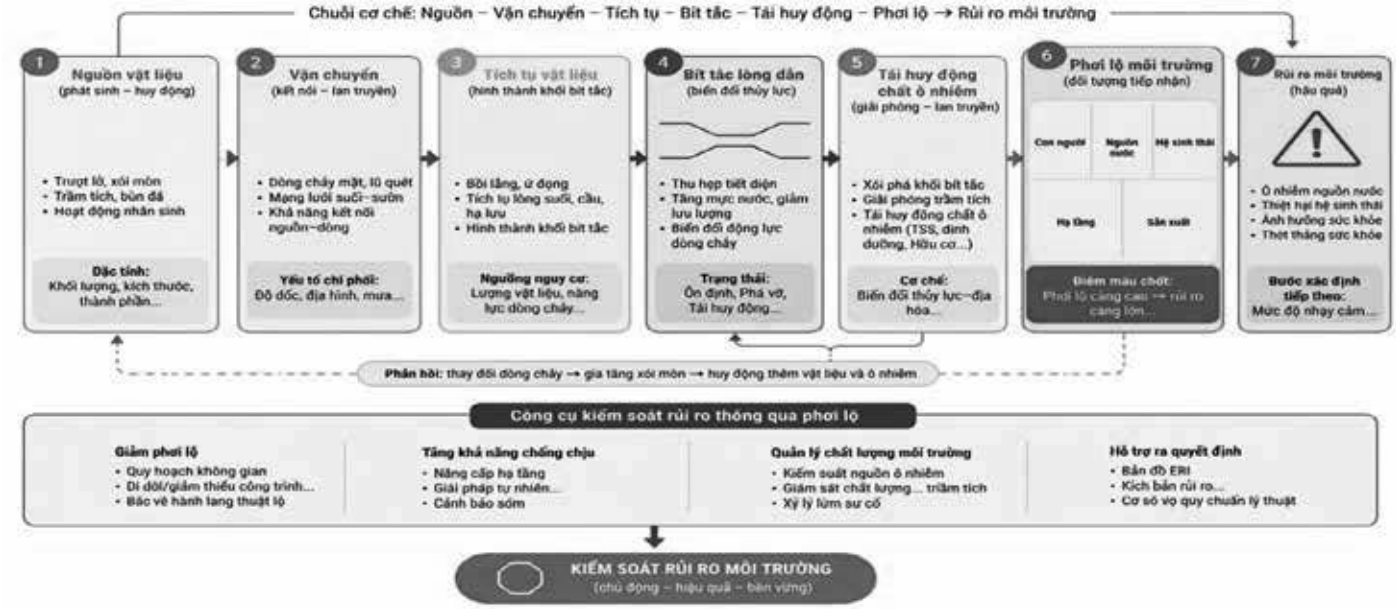


Hình 1. Đề xuất các quan hệ/giải thuyết cần kiểm chứng

Bảng 1. Tổng hợp các nhóm nghiên cứu và khoảng trống đối với bài toán phơi lộ ô nhiễm

Hướng nghiên cứu	Kết quả có thể kế thừa	Khoảng trống cần giải quyết
Đập do trượt lở [1 - 5]	Cơ chế hình thành, chỉ số hình thái, ổn định và phá vỡ	Ít tích hợp chỉ tiêu chất lượng nước và đối tượng môi trường
GIS nghẽn dòng [13 - 14]	Phân vùng theo đoạn sông; tích hợp DEM và mạng sông	Chưa lượng hóa nguồn ô nhiễm và biến đổi thủy động lực - địa hóa
Trượt lở/dòng bùn đá Việt Nam [6 - 7]	Nguồn vật liệu, run out, AHP/FR/ML, kiểm chứng thực địa	Chưa chuyển đầy đủ từ nhạy cảm sườn sang khả năng nghẽn tại đoạn suối
Lũ quét và đánh giá phơi lộ [8]	MCE; kinh nghiệm tách hiểm họa và phơi lộ	Cơ chế hình thành và đường tác động khác với nghẽn dòng
Nước - trầm tích [9 - 12]	Hóa học nước, DO, kim loại và tái huy động trầm tích	Chưa ghép với nguy cơ nghẽn để xác định ưu tiên theo đoạn suối

Chuỗi cơ chế được đề xuất như Hình 2, qua đó mô tả đầy đủ quá trình hình thành và lan truyền rủi ro. Cách tiếp cận này tạo cơ sở xây dựng hướng nghiên cứu phơi lộ môi trường như một sản phẩm định lượng của chuỗi cơ chế phát sinh-vận chuyển-tích tụ-nghẽn dòng-tái huy động-phơi lộ, hướng tới khả năng dự báo và cảnh báo rủi ro môi trường.



Hình 2. Chuỗi cơ chế từ nguồn vật liệu - nghẽn dòng đến tích tụ/tái huy động chất ô nhiễm và phơi lộ môi trường (*khung đề xuất của tác giả*)

3. KHUNG ĐÁNH GIÁ BPEI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Đơn vị phân tích, kiểm kê sự kiện và dữ liệu đầu vào

Đơn vị phân tích là các đoạn suối có điều kiện tương đối đồng nhất, được phân định tại hợp lưu hoặc nơi biến đổi rõ về độ dốc, kích thước lòng dẫn, mức thu hẹp thung lũng và dạng địa mạo. Mỗi đoạn gồm bốn hợp phần liên kết: khu vực cung cấp vật liệu trên sườn; đường truyền vật liệu về lòng suối; phạm vi tiếp nhận và tích tụ trong lòng dẫn; khu vực chịu tác động đến các thành phần tự nhiên và hoạt động sử dụng tài nguyên. Cơ sở thông tin phục vụ phân tích bao quát địa hình số, chuỗi ảnh quan sát Trái đất, điều kiện địa chất - thổ nhưỡng, chế độ mưa, đặc trưng che phủ và sử dụng đất, mạng lưới thủy văn, cùng các thông tin về trượt lở, dòng bùn đá và nguồn thải. Các lớp thông tin về khai thác nước, canh tác, thảm thực vật và sinh cảnh được bổ sung để phản ánh nguồn phát sinh, quá trình truyền vật liệu và các thành phần có khả năng chịu tác động.

3.2. Cấu trúc bốn hợp phần của BPEI

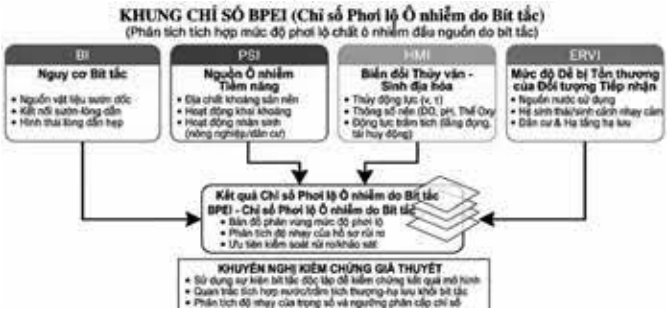
BI phản ánh khả năng hình thành nghẽn thông qua ba nhóm: điều kiện nguồn vật liệu; mức kết nối vật liệu với lòng dẫn; và điều kiện hình thái của đoạn suối. PSI phản ánh tiềm năng nguồn ô nhiễm từ nền địa hóa, khai khoáng, nông nghiệp, dân cư/chăn nuôi, giao thông - xây dựng và vật liệu trượt mới bóc lộ. HMI mô tả mức độ mà nghẽn có thể làm biến đổi vận tốc, độ sâu, thời gian lưu, lắng - xói, DO, pH/ORP và trao đổi nước - trầm tích. ERI phản ánh sự hiện diện và quy mô tương đối của nguồn nước sử dụng, đất sản xuất, hệ sinh thái/sinh cảnh và dân cư/công trình.

Các chỉ tiêu phải được kiểm tra tính trùng lặp trước khi đưa vào mô hình. Đối với biến có quan hệ thuận với nguy cơ/phơi lộ, có thể chuẩn hóa; với biến có quan hệ nghịch thì đảo chiều. Trọng số ban đầu có thể xác định bằng AHP/Delphi với tỷ số nhất quán CR < 0,10, sau đó đánh giá độ nhạy và khi số lượng mẫu đủ lớn, so sánh với trọng số suy ra từ dữ liệu. Điểm mỗi hợp phần được tính riêng để duy trì khả năng giải thích:

$$M_k = \Sigma(w_ki \times x^*_ki), \text{ với } \Sigma w_ki = 1 \quad (1)$$

Ở bước tích hợp, dạng tổng tuyến tính BPEI_A = αBI + βPSI + γHMI + δERI thuận lợi cho sàng lọc và truyền thông quản lý, nhưng có thể xảy ra bù trừ giữa các hợp phần. Do đó nên phân tích song song một dạng không bù trừ mạnh, chẳng hạn trung bình nhân có trọng số BPEI_G = BI^α × PSI^β × HMI^γ × ERI^δ. Việc phân cấp thấp - trung bình - cao chỉ

được chốt sau khi kiểm chứng; Trong giai đoạn nghiên cứu sơ khởi, các phương pháp phân tách dữ liệu như hàm phân vị hoặc phân đoạn tự nhiên có thể được áp dụng để xác định các mức độ rủi ro mang tính chất tương đối; các giá trị ranh giới này hoàn toàn không mang ý nghĩa là ngưỡng giới hạn nguy hại tuyệt đối).



Hình 3. Khung BPEI gồm bốn hợp phần BI - PSI - HMI - ERI và đầu ra phân vùng ưu tiên

Các tầng dữ liệu trong khung BPEI được chồng lớp không gian và tích hợp thông số một cách độc lập để kết xuất ra chỉ số phơi lộ. Phương pháp luận này cho phép tối ưu hóa việc phân vùng mức độ phơi lộ rủi ro, phân tích độ nhạy của mô hình, đồng thời đặt ra hệ khuyến nghị kiểm chứng giả thuyết chặt chẽ qua dữ liệu quan trắc thực địa đa pha, hỗ trợ hiệu quả cho công tác lập kịch bản và ưu tiên giám sát lưu vực sông suối đầu nguồn miền núi.

3.3. Thiết kế quan trắc nước - trầm tích và kiểm chứng

Hình 4. Thiết kế quan trắc S0-S4 dọc theo đoạn suối có khối nghẽn

Mỗi đoạn nghẽn điển hình bố trí tối thiểu 5 vị trí như Hình 4. Tại mỗi điểm cần đo mực nước/lưu lượng và nhóm chỉ tiêu hiện trường gồm pH, EC, DO, ORP, nhiệt độ, độ đục; lấy mẫu nước cho TSS, chất hữu cơ, N-P và nhóm kim loại/á kim lựa chọn theo nền địa chất - nguồn thải; đồng thời, tiến hành thu thập mẫu trầm tích tầng mặt để phân tích thành phần cấp hạt, tổng các-bon hữu cơ (TOC) và các chất ô nhiễm liên kết với trầm tích. Chiến lược thời gian quan trắc phải bao phủ cả chu kỳ mùa khô, mùa mưa và tích hợp cơ chế lấy mẫu kích hoạt theo sự kiện ngay sau các đợt mưa lớn hoặc sạt lở đất. Trong trường hợp ghi nhận được các sự kiện thực tế, cần ưu tiên thực hiện đo đạc theo chuỗi thời gian liên tục bao gồm ba giai đoạn: trước, trong và sau khi xảy ra hiện tượng bít tắc lòng dẫn hoặc phá vỡ khối vật cản.

3.4. Phân tích độ nhạy và kiểm soát bất định

Phân tích độ nhạy phải bao gồm ít nhất bốn thành phần: thay đổi trọng số trong một khoảng hợp lý; thay đổi phương pháp chuẩn hóa; thay đổi ngưỡng/phương pháp phân cấp; và thay đổi quy tắc chia đoạn suối. Các đoạn đổi cấp mạnh khi chỉ thay đổi nhỏ giả định phải được gắn cờ "không ổn định" và không nên dùng để ra quyết định cứng. Ngoài ra, cần kiểm tra tương quan giữa các chỉ tiêu địa hình để tránh tính lặp một đặc tính nhiều lần. Việc báo cáo song song điểm của từng hợp phần BI, PSI, HMI, ERI cùng điểm tổng hợp giúp người quản lý nhận biết nguyên nhân của mức ưu tiên thay vì chỉ nhìn một chỉ số duy nhất.

4. CƠ CHẾ ẢNH HƯỞNG CỦA NGHẼN DÒNG ĐẾN PHƠI LỘ Ô NHIỄM

4.1. Hai trạng thái môi trường chính của khối nghẽn

Khi khối nghẽn tương đối ổn định, nước dâng phía thượng lưu làm giảm vận tốc, tăng thời gian lưu và tăng khả năng lắng của hạt mịn. Đây là điều kiện thuận lợi cho tích tụ phospho gắn hạt, vật chất hữu cơ và kim loại hấp phụ lên bề mặt hạt, đồng thời thời gian tiếp xúc nước - trầm tích dài hơn có thể làm thay đổi DO, pH và ORP. Vì vậy, cùng một tải lượng đầu vào, phân bố giữa pha nước và pha trầm tích có thể khác đáng kể so với đoạn suối chảy tự do. Nghiên cứu về đập nhỏ và DO không thể được chuyển nguyên trạng sang đập do trượt lở, nhưng cung cấp bằng chứng cơ chế rằng việc tăng thời gian lưu và tạo vùng nước tĩnh có thể thay đổi điều kiện oxy trong dòng chảy.

Khi khối nghẽn bị xói, tràn hoặc phá vỡ, ứng suất đáy và lưu lượng có thể tăng nhanh, làm tái huy động phần trầm tích đã lưu giữ. Khi đó hệ thống chuyển từ trạng thái bể giữ tạm thời sang nguồn phát thải thứ cấp. Tác động môi trường có thể xuất hiện dưới dạng xung: TSS/độ đục tăng mạnh, chất ô nhiễm gắn hạt lan truyền về hạ lưu và các bãi bồi mới hình thành trở thành nơi lưu giữ thứ cấp. Crawford và cộng sự [11] cho thấy tái huy động chất ô nhiễm từ trầm tích trong sự kiện dòng chảy cực đoan là cơ chế đáng quan tâm đối với sức khỏe môi trường; điều này củng cố yêu cầu quan trắc theo sự kiện thay vì chỉ lấy mẫu định kỳ theo tháng/quý.

Bảng 2. Ma trận định tính về hướng biến đổi môi trường theo trạng thái khối nghẽn

Biến phản ứng	Khối nghẽn ổn định	Xói / phá vỡ khối nghẽn	Hệ quả
Vận tốc dòng chảy (v)	↓	↑ / Xung	Quyết định năng lượng xói mòn và khả năng vận chuyển chất bồi lắng.
Thời gian lưu nước (HRT)	↑	↓ Nhanh	Ảnh hưởng trực tiếp đến động học phản ứng sinh - hóa sinh thái lòng sông.
Lắng trầm tích	↑	↓ / Tái huy động	Trạng thái nghẽn giữ lại phù sa; phá nghẽn làm giải phóng bồi lắng hạ lưu.
TSS/Độ đục hạ lưu	↓ / ↔ Ổn định	↑↑ (Xung mạnh)	Tổng chất rắn lơ lửng bùng phát cơ học khi khối vật cản bị phá vỡ đột ngột.
DO (Oxy hòa tan)	↓ (Cục bộ)	∼ Biến động mạnh	Nghẽn dòng gây tù túng suy giảm oxy; phá nghẽn gây xáo trộn sục khí liên tục.
Tải huy động chất ô nhiễm	Thấp - Trung bình	Cao	Nguy cơ giải phóng tích tụ độc chất (kim loại nặng, hữu cơ) từ trầm tích đáy.

Chú thích: Các kí hiệu thể hiện giả thuyết cơ chế cần kiểm chứng bằng quan trắc; không phải trị số thực nghiệm

4.2. Các nhóm chất và con đường phơi lộ

Đối với TSS và độ đục, vùng nước dâng thường tăng khả năng lắng trong giai đoạn ổn định nhưng khi phá vỡ có thể tạo xung lớn về hạ lưu. Đối với N-P và chất hữu cơ, tăng thời gian lưu có thể thúc đẩy lắng phospho gắn hạt, khoáng hóa hữu cơ và thay đổi cân bằng nitrat hóa - khử nitrat tùy mức DO. Đối với kim loại/á kim, cần phân tích đồng thời pha hòa tan và trầm tích vì hấp phụ/giải hấp phụ phụ thuộc pH, ORP, chất hữu cơ và ô-xít Fe-Mn. Hercolano và cộng sự [10] cho thấy một sự kiện trượt lở có thể tạo biến đổi điều kiện redox và giải phóng Mn, Fe cùng một số nguyên tố vết trong thời gian kéo dài; nghiên cứu sông Hồng [12] đồng thời cho thấy vai trò quan trọng của trầm tích trong đánh giá kim loại.

Không gian phơi lộ được chia thành ba vùng chức năng. Vùng A phía thượng lưu chịu nước dâng, tăng lắng và nguy cơ ngập cục bộ; đối tượng nhạy cảm là điểm lấy nước, ruộng ven suối và sinh cảnh chịu ngập kéo dài. Vùng B tại khối nghẽn là vùng trao đổi mạnh, có thấm, gradient thủy lực và xói cục bộ; cần chú ý khả năng mất ổn định và giải phóng trầm tích. Vùng C hạ lưu nhạy với thay đổi lưu lượng và đặc biệt là xung trầm tích/chất ô nhiễm khi phá vỡ. Do đó, việc áp dụng một vùng đệm cố định dọc theo hành lang sông suối cho toàn bộ lưu vực là không khả thi. Ranh giới vùng chịu tác động phải được xác định động dựa trên đặc tính địa hình, mối quan hệ động lực học thượng - hạ lưu và các minh chứng thực địa.

Bảng 3. Liên hệ trạng thái nghẽn với quá trình môi trường và dạng phơi lộ ưu tiên

Trạng thái	Quá trình chi phối	Biểu hiện/phơi lộ cần theo dõi
Nghẽn mới hình thành	Nước dâng nhanh, giảm vận tốc, bắt đầu lắng	Ngập cục bộ; tăng độ đục phía thượng lưu; gián đoạn/biến đổi điểm lấy nước
Nghẽn ổn định	Tăng thời gian lưu, lắng và trao đổi nước - trầm tích	Tích tụ hạt mịn, N-P/chất hữu cơ/kim loại gắn hạt; DO-ORP thay đổi
Xói hoặc phá vỡ	Tăng Q, ứng suất đáy và tái huy động	Xung TSS và chất ô nhiễm; lan truyền nhanh về hạ lưu
Sau sự kiện	Tái phân bố trầm tích và hình thái mới	Ô nhiễm tồn lưu trong bãi bồi/trầm tích; thay đổi sinh cảnh và nguồn nước

5. KẾT LUẬN

Nghẽn dòng tại sông suối miền núi là quá trình liên kết địa mạo - thủy lực - địa hóa - môi trường. Trượt lở/dòng bùn đá tạo nguồn vật liệu, nhưng phơi lộ ô nhiễm còn phụ thuộc khả năng vật liệu tiếp cận và chặn lòng dẫn, biến đổi vận tốc - thời gian lưu, lắng - tái huy động, điều kiện oxy hóa - khử và sự hiện diện của đối tượng tiếp nhận. Khối nghẽn ổn định có thể là bể giữ tạm thời; xói hoặc phá vỡ có thể chuyển hệ thống sang phát thải xung về hạ lưu. Khung BPEI cho phép tách bốn lớp nguyên nhân trước khi tích hợp thành thứ tự ưu tiên. Quan trắc S0-S4, lấy mẫu theo mùa/sự kiện, phân tích đồng thời nước, trầm tích, tính tải lượng C×Q và kiểm chứng độc lập là điều kiện để chuyển khung khái niệm thành mô hình định lượng. Với các lưu vực miền núi phía Bắc, BPEI có thể hỗ trợ lựa chọn đoạn suối cần khảo sát, bố trí quan trắc và phân bổ nguồn lực, tiếp theo cần hoàn thiện kiểm kê sự kiện, hiệu chỉnh trọng số từ thực địa và kiểm định khả năng chuyển giao giữa các lưu vực.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Chương trình khoa học và công nghệ cấp Bộ Nông nghiệp và Môi trường đã hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này thông qua đề tài "Nghiên cứu thành lập bản đồ nguy cơ nghẽn dòng đầu nguồn vùng núi trên cơ sở ứng dụng trí tuệ nhân tạo và dữ liệu viễn thám đa nguồn phục vụ công tác cảnh báo lũ, trượt lở đất", mã số 20260907001.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Casagli N, Ermini L. Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine. Transactions, Japanese Geomorphological Union, vol. 20, no. 3, pp. 219-249, 1999.

[2] Costa JE, Schuster RL. The formation and failure of natural dams. Geological Society of America Bulletin, vol. 100, no. 7, pp. 1054-1068, 1988, doi: 10.1130/0016-7606(1988)100%3C1054:TFAFON%3E2.3.CO;2.

[3] Dal Sasso SF, Sole A, Pascale S, Sdao F, Bateman Pinzòn A and Medina V. Assessment methodology for the prediction of landslide dam hazard. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 14, pp. 557-567, 2014, doi: 10.5194/nhess-14-557-2014.

[4] Dinh NC, Manh ND, Lan NC, Tuan NA, Prakash I, Dung VQ, Kien NT, Nghia DT and Thang NV. GIS-based Flow-R model for debris flow susceptibility mapping: A case study from Muong Bo, Lao Cai, Vietnam. Journal of Science and Transport Technology, vol. 6, no. 1, pp. 29-47, 2026, doi: 10.58845/jstt.utt.2026.en.6.1.29-47.

[5] Duong BV, Fomenko IK, Nhu HV, Nguyen PH, Sirotkina ON, Nguyen KT and Pham HNT. Landslide hazard assessment for the Batxat area of Vietnam using GIS-based spatial prediction models. Journal of Mining and Earth Sciences, vol. 65, no. 6, pp. 70-81, 2024, doi: 10.46326/JMES.2024.65(6).07.

[6] Ermini L and Casagli N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 28, no. 1, pp. 31-47, 2003, doi: 10.1002/esp.424.

[7] Fan X, Dufresne A, Siva Subramanian S, Strom A, Hermanns R, Tacconi Stefanelli C, Hewitt K, Yunus AP, Dunning S, Capra L, Geertsema M, Miller B, Casagli N, Jansen JD and Xu Q. The formation and impact of landslide dams - State of the art. Earth-Science Reviews, vol. 203, 103116, 2020, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103116.

[8] Fan X, Dufresne A, Whiteley J, Yunus AP, Subramanian SS, Okeke CAU, Pánek T, Hermanns RL, Ming P, Strom A, Havenith H-B, Dunning S, Wang G and Tacconi Stefanelli C. Recent technological and methodological advances for the investigation of landslide dams. Earth-Science Reviews, vol. 218, 103646, 2021, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103646.

[9] Hien DM, Hoang NV, Dung ML, Dung LH, Thuy NT and Hang VT. Large-scale mapping of landslide and debris flow using FlowR model with statistical and machine learning methods. VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, vol. 38, no. 4, pp. 39-62, 2022, doi: 10.25073/2588-1094/vnuees.4872.

[10] Hoang VD, Tran HT and Nguyen TT. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flash flood risk assessment in the Ngan Sau-Ngan Pho mountainous river basin, North Central of Vietnam. Environment and Natural Resources Journal, vol. 18, no. 2, pp. 110-123, 2020, doi: 10.32526/ennrj.18.2.2020.11.

[11] IPCC. Annex II: Glossary. In Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability, pp. 2897-2930, 2022, doi: 10.1017/9781009325844.029.

[12] Le TTT, Tran TV, Hoang VH, Bui VT, Bui TKT and Nguyen HP. Developing a landslide susceptibility map using the analytic hierarchical process in Ta Van and Hau Thao communes, Sapa, Vietnam. Journal of Disaster Research, vol. 16, no. 4, pp. 529-538, 2021, doi: 10.20965/jdr.2021.p0529.

[13] Pham HG and Kieu QL. Research on the factors contributing to flash floods in the Northern mountainous region of Vietnam: Criteria, weights and evaluation indexes. Bulletin of Geography. Physical Geography Series, vol. 28, pp. 17-31, 2025, doi: 10.12775/bgeo-2025-0002.

[14] Tacconi Stefanelli C, Casagli N, and Catani F. Landslide damming hazard susceptibility maps: A new GIS-based procedure for risk management. Landslides, vol. 17, pp. 1635-1648, 2020, doi: 10.1007/s10346-020-01395-6.

[15] Tacconi Stefanelli C, Frodella W, Caleca F, Raimbekova Z, Umaraliev R and Tofani V. Assessing landslide damming susceptibility in Central Asia. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 24, pp. 1697-1720, 2024, doi: 10.5194/nhess-24-1697-2024.

■Ngày nhận bài: 08/8/2026 ■Ngày sửa bài: 17/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng 04/9/2026

Đề xuất Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh - Kết quả khảo sát tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An năm 2026

Proposal for a Smart urban water supply management indicator set - Survey results at Nghe An water Supply Joint Stock Company 2026

> PGS.TS NGUYỄN THỊ NGỌC DUNG[1,*], THS PHẠM HUY BẰNG[2]
[1]Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh, tỉnh Nghệ An
[*]Email: dungnn.hau@gmail.com

TÓM TẮT

Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số đề xuất bao gồm 04 nhóm chỉ số và 10 chỉ số cụ thể. Trong đó, 04 nhóm chỉ số lựa chọn phản ánh được nội dung quản lý chủ yếu theo mỗi công đoạn của hệ thống cấp nước, để đánh giá đúng tình hình áp dụng công nghệ số trong công tác quản lý cấp nước đô thị thuộc quyền quản lý chuyên môn của các Công ty cấp nước. 10 chỉ số lựa chọn đảm bảo tính khả dụng, khả thi, tính phối hợp liên ngành và có thể định lượng được.

Từ khóa: Bộ chỉ số; quản lý cấp nước; chuyển đổi số; đô thị thông minh.

ABSTRACT

The proposed set of indicators for smart urban water supply management for the 2026 - 2035 period-aligned with digital transformation goals-comprises four indicator groups and ten specific indicators. The four selected groups reflect key management aspects across each stage of the water supply system, enabling an accurate assessment of digital technology adoption in urban water supply management by water supply companies. The ten selected indicators ensure usability, feasibility, inter-sectoral coordination, and quantifiability.

Keywords: Indicators; water supply management; digital transformation; smart cities.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đề xuất xây dựng Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số là để đánh giá trên các phương diện, các khía cạnh khác nhau về sự làm việc của một hệ thống cấp nước đô thị hiện đại. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh cần được đề xuất phù hợp với yêu cầu của cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 là tận dụng một cách triệt để sức mạnh của số hóa và công nghệ thông tin. [1, 2].

Trong khuôn khổ của bài báo khoa học, nhóm tác giả sẽ đề xuất xây dựng Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số, Các chỉ số đề xuất, căn cứ vào các văn bản pháp luật hiện hành về cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ 4; Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam; Đề án Chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2024 - 2025, định hướng đến 2030. Chương trình mục tiêu ứng phó với biến đổi khí hậu và tăng trưởng xanh; Định hướng phát triển ngành nước; Kế hoạch cấp nước an toàn….[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Danh mục các chỉ số đề xuất sẽ là thước đo ban đầu và là một trong những công cụ để đánh giá mức độ quản lý cấp nước đô thị thông minh theo hướng chuyển đổi số của doanh nghiệp trong thời điểm hiện tại và lên kế hoạch áp dụng trong tương lai [1, 3]. Chính vì vậy, việc đề xuất xây dựng Bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số là một mắt xích quan trọng để đẩy nhanh tiến trình xây dựng các đô thị thông minh ở Việt Nam.

2. ĐỀ XUẤT BỘ CHỈ SỐ QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ THÔNG MINH GIAI ĐOẠN 2026 - 2035 THEO MỤC TIÊU CHUYỂN ĐỔI SỐ

2.1. Quan điểm và nguyên tắc đề xuất bộ chỉ số

Dựa trên kết quả rà soát, đánh giá, phân tích hiện trạng quản lý cấp nước đô thị; thu thập và sử dụng các văn bản pháp luật có liên quan (đã được liệt kê trong danh mục tài liệu tham khảo); tham khảo một số bộ chỉ số về cấp nước đô thị; các chỉ tiêu quản lý cấp nước đô thị thông minh được đề xuất dựa trên những quan điểm và nguyên tắc sau đây:

a. Quan điểm đề xuất các chỉ số

1. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số cần phản ánh đúng tình hình thực tế công tác quản lý cấp nước đô thị hiện nay theo hướng tiếp cận công nghệ thông tin.

2. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh được xây dựng phù hợp với các văn bản pháp luật quy định hiện hành về quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số.

3. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi *số* đề xuất có sự tham khảo các chỉ *số* đô thị quốc tế và Việt Nam có liên quan đến quản lý cấp nước đô thị.

4. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số phải bảo đảm tính khoa học, sử dụng công nghệ số trong quản lý toàn hệ thống và từng công đoạn của hệ thống cấp nước đô thị.

5. Các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số cần tăng cường tính chủ động, sự phối hợp giữa các ngành và các bên liên quan trong quản lý tự động các công đoạn của hệ thống cấp nước đô thị.

b. Nguyên tắc xác định các chỉ số

1. Những chỉ số lựa chọn cần phản ánh được nội dung quản lý chủ yếu theo mỗi công đoạn của hệ thống cấp nước, để đánh giá đúng tình hình áp dụng công nghệ số trong công tác quản lý cấp nước đô thị thuộc quyền quản lý chuyên môn của các công ty cấp nước trong cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4.

2. Các chỉ số lựa chọn cần đảm bảo tính khả dụng, khả thi, tính phối hợp liên ngành. Do vậy cần xem xét để kế thừa các chỉ số có sẵn, ưu tiên các chỉ số được nhiều cơ quan, tổ chức trong nước và quốc tế quan tâm và sử dụng.

3. Các chỉ số lựa chọn cần đáp ứng theo Định hướng phát triển ngành nước, Chương trình, Chiến lược quốc gia về phát triển đô thị thông minh của Việt Nam, Đề án Chuyển đổi số ngành Xây dựng định hướng đến 2030 đồng thời xem xét học tập các chỉ số quốc tế.

4. Các chỉ số lựa chọn cần đảm bảo nguồn thông tin có thể thu thập được và đảm bảo độ tin cậy cần thiết theo yêu cầu về chất lượng của số liệu và đảm bảo tính liên thông bền vững của dữ liệu.

5. Các chỉ số lựa chọn đều là các chỉ số định lượng, được tính theo tỷ lệ phần trăm của mỗi chỉ số để dễ dàng theo dõi mức độ áp dụng quản lý cấp nước đô thị thông minh của từng Công ty Cấp nước và so sánh giữa các công ty có cùng chức năng trên phạm vi toàn quốc.

6. Danh mục các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số giúp cho các cơ quan quản lý nhà nước có liên quan ở Trung ương và địa phương có đủ thông tin cập nhật, có cơ sở để chỉ đạo công tác quản lý và đầu tư hiệu quả.

2.2. Đề xuất các nhóm chỉ số và các chỉ số

a. *Tiêu chí lựa chọn*

Khi cân nhắc lựa chọn các nhóm chỉ số, và các chỉ số cần tuân thủ theo 4 tiêu chí sau:

Tiêu chí 1. Các nhóm chỉ số trong bộ chỉ số phải bao quát được nội dung cơ bản của quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số.

Tiêu chí 2. Các chỉ số trong mỗi nhóm chỉ số phải bao quát được nội dung cơ bản của quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số trong mỗi nhóm.

Tiêu chí 3. Ưu tiên các chỉ số phổ biến, có sẵn, dễ thu thập được từ các Công ty Cấp nước.

Tiêu chí 4. Ưu tiên các chỉ số được tổng hợp định kỳ để có thể có các thông tin định kỳ thu thập được từ các Công ty Cấp nước.

b. Đề xuất các nhóm chỉ số và các chỉ số

Trên cơ sở 4 tiêu chí đề ra, lựa chọn được 04 nhóm chỉ số và 10 chỉ số được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Đề xuất các nhóm chỉ số và số chỉ số trong quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số

Số TT	Tên nhóm chỉ số	Số chỉ số
1	Quản lý nguồn nước và công trình thu nước	2
2	Quản lý nhà máy nước	2
3	Quản lý mạng lưới cấp nước và các công trình trên mạng lưới	3
4	Quản lý tài sản và quản lý khách hàng	3
	Tổng cộng	**10**

2.3. Đề xuất danh mục các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số

Bảng 2. Danh mục các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số

Số TT	Mã số	Các nhóm chỉ số và các chỉ số
		1. Quản lý nguồn nước và công trình thu nước
1	CN 0101	Tỷ lệ nguồn nước mặt được lắp đặt thiết bị cảm biến thông minh IoT để theo dõi sự lan truyền của chất gây ô nhiễm vào công trình thu nước (%).
2	CN 0102	Tỷ lệ lưu lượng nước thô cung cấp cho các nhà máy nước được kiểm soát bằng công nghệ số (%).
		2. Quản lý nhà máy nước
3	CN 0201	Tỷ lệ các công trình pha chế, định lượng hóa chất và các công trình xử lý nước được quản lý vận hành bằng kỹ thuật số (%)
4	CN 0202	Tỷ lệ các chỉ tiêu chất lượng nước sau xử lý (sau bể chứa nước sạch) quy định trong quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước ăn uống hiện hành được kiểm soát tự động bằng cảm biến thông minh IoT (%).
		3. Quản lý mạng lưới cấp nước và các công trình trên mạng lưới
5	CN 0301	Tỷ lệ các thông số áp lực, lưu lượng nước tại các điểm trên mạng lưới cấp nước được đo đếm thông qua hệ thống thông tin dữ liệu GIS và cảm biến thông minh IoT (%).
6	CN 0302	Tỷ lệ mạng lưới đường ống cấp nước được kiểm soát tiêu thụ và phát hiện thất thoát nước do được sử dụng công cụ Big Data và IoT (%).
7	CN 0303	Tỷ lệ kết nối các công trình từ các trạm bơm, bể chứa cho đến các tuyến ống phân phối, thông qua mạng lưới IoT. (%).
		1. Quản lý tài sản và quản lý khách hàng
8	CN 0401	Tỷ lệ tuyến ống cấp 1 lắp đặt mới và cải tạo được cập nhật trên phần mềm chuyên dụng để quản lý tài sản mạng lưới đường ống (%).
9	CN 0402	Tỷ lệ khách hàng sử dụng nước được kết nối hệ thống hóa đơn điện tử, thanh toán điện tử trên di động và Website (%).
10	CN 0403	Tỷ lệ thông tin phản ánh của khách hàng qua số điện thoại (hotline) được bộ phận chuyên trách của công ty tiếp nhận và xử lý kịp thời (%).

3. ĐỀ XUẤT TÍNH TOÁN CÁC CHỈ SỐ QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ THÔNG MINH THEO MỤC TIÊU CHUYỂN ĐỔI SỐ VÀ CÁC SỐ LIỆU THU THẬP TẠI CÔNG TY CP CẤP NƯỚC NGHỆ AN NĂM 2026

3.1. Đề xuất tính toán các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số và kết quả khảo sát 10 chỉ số

Bảng 3. Phương pháp tính toán các chỉ số và các số liệu thu thập

Mã số	Tên chỉ số	Các biến số cần thu thập	Phương pháp tính	Số liệu thu thập năm 2026 (%)	
				Giá trị các Biến số	Kết quả
CN 0101	Tỷ lệ nguồn nước mặt dược lắp đặt thiết bị cảm biến thông minh IoT để theo dõi sự lan truyền của chất gây ô nhiễm vào công trình thu nước (%).	*(1) Số nguồn nước mặt đã được lắp đặt cảm biến (Số nguồn).* *(2) Số nguồn nước mặt công ty đang sử dụng (Số nguồn).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 0 (2) = 2	**0%**
CN 0102	Tỷ lệ lưu lượng nước thô cung cấp cho các nhà máy nước được kiểm soát bằng công nghệ số (%).	*(1) Lưu lượng nước thô được kiểm soát (m^3/ngày).* *(2) Lưu lượng nước thô cung cấp (m^3/ngày).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) =104.000 (2) =104.000	**100%**
CN 0201	Tỷ lệ các công trình pha chế, định lượng hóa chất và các công trình xử lý nước được quản lý vận hành bằng kỹ thuật số (%).	*(1) Số công trình được quản lý vận hành bằng kỹ thuật số (Số công trình).* *(2) Số công trình hiện có (Số công trình).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 0 (2) = 24	**0%**
CN 0202	Tỷ lệ các chỉ tiêu chất lượng nước sau xử lý (sau bể chứa nước sạch) quy định trong quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước ăn uống hiện hành được kiểm soát tự động bằng cảm biến thông minh IoT (%).	*(1) Các chỉ tiêu chất lượng nước sau xử lý được kiểm soát tự động bằng cảm biến thông minh IoT (Số chỉ tiêu).* *(2) Các chỉ tiêu chất lượng nước sau xử lý hiện tại (Số chỉ tiêu).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 3 (2) = 15	**20%**
CN 0301	Tỷ lệ các thông số áp lực, lưu lượng nước tại các điểm trên mạng lưới cấp nước được đo đếm thông qua hệ thống thông tin dữ liệu GIS và cảm biến thông minh IoT (%).	*(1) Số thông số áp lực, lưu lượng nước tại các điểm trên mạng lưới cấp nước được đo đếm thông qua GIS và IoT (Số thông số).* *(2) Số thông số áp lực, lưu lượng nước tại các điểm trên mạng lưới cấp nước (Số thông số).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 98 (2) = 287	**34%**
CN 0302	Tỷ lệ mạng lưới đường ống cấp nước được kiểm soát tiêu thụ và phát hiện thất thoát nước do được sử dụng Big Data và IoT (%).	*(1) Số km đường ống cấp nước được kiểm soát tiêu thụ và phát hiện thất thoát nước do được sử dụng công cụ Big Data và IoT (Km).* *(2) Tổng số km đường ống cấp nước (Km).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 729 (2) = 2.513	**29%**
CN 0303	Tỷ lệ kết nối các công trình từ các trạm bơm, bể chứa cho đến các tuyến ống phân phối, thông qua mạng lưới IoT (%).	*(1) Số công trình được kết nối thông qua mạng lưới IoT. (Số công trình).* *(2) Tổng số công trình (Số công trình).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 9 (2) = 9	**100%**
CN 0401	Tỷ lệ các tuyến ống cấp 1 lắp đặt mới và cải tạo được cập nhật trên phần mềm chuyên dụng để quản lý tài sản mạng lưới đường ống (%).	*(1) Các tuyến ống cấp 1 lắp đặt mới và cải tạo được cập nhật trên phần mềm chuyên dụng (Km).* *(2) Tổng số các tuyến ống cấp 1 lắp đặt mới và cải tạo được cập nhật trên phần mềm chuyên dụng (Km).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 7,996 (2) = 21,371	**37,41%**
CN 0402	Tỷ lệ khách hàng sử dụng nước được kết nối hệ thống hóa đơn điện tử, thanh toán điện tử trên di động và Website (%).	*(1) Số khách hàng sử dụng nước được kết nối (Số khách hàng).* *(2) Số khách hàng sử dụng nước (Số khách hàng).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 134.254 (2) = 138.353	**97,0 %**
CN 0403	Tỷ lệ thông tin phản ánh của khách hàng qua số điện thoại (hotline) được bộ phận chuyên trách của công ty tiếp nhận và xử lý kịp thời (%).	*(1) Số khách hàng phản ánh được tiếp nhận và xử lý kịp thời (Số khách hàng).* *(2) Số khách hàng phản ánh (Số khách hàng).*	(1)/(2) x 100 (%)	(1) = 350 (2) = 350	**100%**

3.2. Đánh giá kết quả khảo sát 10 chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An năm 2026

Qua các số liệu thu thập tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An năm 2026 của các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số đề xuất, kết quả các số liệu khảo sát được chia làm 3 nhóm: Đã triển khai thực hiện, đang triển khai thực hiện và chưa triển khai thực hiện theo kỹ thuật số được đánh giá cụ thể trong Bảng 4.

Bảng 4. Đánh giá kết quả khảo sát 10 chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An năm 2026

Số TT	Đánh giá theo 3 nhóm thực hiện	Số chỉ số trong nhóm	Mã số chỉ số CN trong nhóm	Đánh giá theo 3 mức độ
1	Đã triển khai thực hiện,	4	0102; 0203; 0402; 0403;	Rất tốt
2	Đang triển khai thực hiện,	4	0202; 0301; 0302; 0401;	Tốt
3	Chưa triển khai thực hiện,	2	0101; 0201	Chưa tốt

Hiện tại chỉ số về quản lý nguồn nước mặt và chỉ số về quản lý các công trình xử lý trong nhà máy nước chưa được quản lý vận hành bằng kỹ thuật số, cần đặc biệt được quan tâm đầu tư thực hiện.

3.3. Các bước triển khai thực hiện xây dựng Bộ chỉ số cấp nước đô thị thông minh theo mục tiêu chuyển đổi số

Để đề xuất các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh có tính khả thi, khả dụng và đánh giá được toàn cảnh bức tranh về việc thực hiện cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 của ngành cấp nước đô thị Việt Nam và Nghệ An, cần thực hiện theo các bước sau:

1. Điều tra khảo sát tình hình thực hiện cấp nước đô thị thông minh tại một số công ty cấp nước.
2. Thiết lập cơ sở khoa học xây dựng các chỉ số cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số.
3. Đề xuất bộ chỉ số cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số.
4. Hướng dẫn phương pháp tính toán các chỉ số cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số.
5. Khảo sát thử nghiệm tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An.
6. Đánh giá kết quả khảo sát

4. KẾT LUẬN

Việc đề xuất nội dung bộ chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số sẽ là công cụ hiệu quả để:

1. Phục vụ công tác đánh giá mức độ và khả năng triển khai các hoạt động cấp nước đô thị thông minh tại Công ty CP Cấp nước Nghệ An;
2. Giúp Bộ Xây dựng là đơn vị chủ quản có cơ sở dữ liệu để đánh giá tình hình thực hiện cấp nước thông minh tại các đô thị Việt Nam;
3. Giúp các công ty cấp nước có cơ sở để đánh giá mức độ đạt được về cấp nước đô thị thông minh của công ty mình theo mặt bằng chung và có kế hoạch đầu tư công nghệ mới và ứng dụng công nghệ thông tin trong quản lý hệ thống cấp nước thông minh cho giai đoạn tiếp theo;
4. Góp phần bổ sung cơ sở dữ liệu trong công tác đào tạo ngành cấp thoát nước Việt Nam.

Việc sử dụng các chỉ số chính đánh giá về hiệu quả hoạt động cho đô thị thông minh nói chung và lĩnh vực cấp nước đô thị thông minh nói riêng là hết sức cần thiết. Khuyến khích sự tham gia đầu tư, xã hội hóa phát triển cấp nước đô thị thông minh trên nguyên tắc tính đúng, tính đủ các chi phí và rủi ro, hài hòa lợi ích của các bên có liên quan. Chính vì vậy, việc đề xuất danh mục các chỉ số quản lý cấp nước đô thị thông minh giai đoạn 2026 - 2035 theo mục tiêu chuyển đổi số là một mắt xích quan trọng để đẩy nhanh tiến trình xây dựng các đô thị thông minh ở Việt Nam [6, 7, 8, 9].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] MA. Pham Huy Bang, Assoc. Prof. Dr. Nguyen Thi Ngoc Dung and Dr. Architect Chau Thanh Hung. Developing a set of smart urban water supply management indicators in the digital transformation orientation for the period of 2026 - 2035. IJIRT, vol. 13, Issue 2, ISSN: 2349-6002, July 2026.

[2] Bộ Thông tin và Truyền thông. Quyết định số 922/QĐ-BTTTT về việc phê duyệt Đề án "Xác định Bộ chỉ số đánh giá chuyển đổi số của các bộ, cơ quan ngang bộ, cơ quan thuộc Chính phủ, các tỉnh, thành phố trực thuộc Trung ương và của quốc gia", 2022.

[3] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 950/QĐ-TTg ngày 01/8/2018 về việc phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018 - 2025 và định hướng đến năm 2030, 2018.

[4] Bộ Xây dựng. Quyết định số 926/QĐ-BXD ngày 11/10/2024 về việc phê duyệt Đề án Chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2024 - 2025, định hướng đến năm 2030, 2024.

[5] Thủ tướng Chính phủ. Chỉ thị số 16/CT-TTg ngày 04/5/2017 về việc tăng cường năng lực tiếp cận cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư 2017.

[6] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 749/QĐ-TTg ngày 03/6/2020 về việc phê duyệt "Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030", 2020.

[7] Chính phủ. Nghị định số 47/2020/NĐ-CP ngày 09/4/2020 về quản lý, kết nối và chia sẻ dữ liệu số của cơ quan nhà nước, 2020.

[8] Ban Chấp hành Trung ương Đảng. 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.

[9] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 2502/QĐ-TTg ngày 22/12/2016 về việc phê duyệt điều chỉnh định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050, 2016.

■ Ngày nộp bài: 10/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 17/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Nghiên cứu phỏng đoán lún để đánh giá mức độ phá hoại của các công trình hiện hữu khi thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM

Settlement prediction research for assessing the damage potential of existing structures during metro tunnel construction using the TBM method

> PGS.TS ĐÀO SỸ ĐÁN
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: sydandao@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu phỏng đoán lún bề mặt đất và các công trình lân cận nhằm đánh giá mức độ phá hoại của công trình hiện hữu khi thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM. Nghiên cứu sử dụng phần mềm PLAXIS 2D với mô hình Mohr-Coulomb kết hợp phương pháp mất mát thể tích (Volume Loss Method) để mô phỏng. Hai kiểu kết cấu công trình một tầng trên móng nông (móng băng và móng bè) được khảo sát ở các vị trí cách tim hai đường hầm thay đổi từ 0 m đến 30 m. Kết quả cho thấy móng bè có khả năng kiềm chế biến dạng ngang tốt hơn móng băng nhờ tính liên tục của kết cấu móng bè. Dựa trên phương pháp của Halim & Wong (2012), mức độ phá hoại của các công trình hiện hữu lân cận được đánh giá ở mức từ rất nhẹ đến nhẹ khi hệ số mất mát thể tích là 1%.

Từ khóa: Phương pháp TBM; phá hoại công trình; phân tích số; phương pháp mất mát thể tích.

ABSTRACT

This paper presents a settlement prediction study on ground surfaces and adjacent structures to assess the damage potential of existing buildings induced by TBM metro tunneling. Numerical simulations are performed using PLAXIS 2D with the Mohr-Coulomb constitutive model incorporated with the volume loss method. Two types of single-story structural configurations on shallow foundations (strip foundation and mat foundation) are investigated at positions where the distance to the twin-tunnel centerline varies from 0 m to 30 m. The results indicate that the mat foundation exhibits superior capability in restraining horizontal strain compared to the strip foundation, owing to the structural continuity inherent in the mat design. Furthermore, based on the assessment framework of Halim & Wong (2012), the damage severity of the adjacent existing structures is evaluated to be within the very slight to slight categories when the volume loss coefficient is maintained at 1%.

Keywords: TBM method; building damage; numerical analysis; volume loss method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống metro ngầm đã được xây dựng nhiều ở các nước phát triển trên thế giới như Mỹ, Nga, Pháp, Đức, Nhật và Trung Quốc. Các tuyến metro ngầm này thường được xây dựng ở khu vực trung tâm của các thành phố lớn, nơi thường có điều kiện địa chất là đất mềm và đã tồn tại nhiều công trình xây dựng hiện hữu. Phương pháp TBM có nhiều ưu điểm, như thi công nhanh, an toàn cao, thích hợp với nhiều loại đất, giảm ô nhiễm môi trường và giảm ảnh hưởng đến đời sống đô thị đông đúc… nên nó thường được sử dụng để thi công các tuyến đường hầm metro. Việc thi công các tuyến hầm metro sẽ làm cho nền đất và các công trình xây dựng xung quanh bị biến dạng (lún thẳng đứng và lún ngang). Nếu biến dạng này không được kiểm soát tốt thì có thể gây phá hoại cho các công trình xây dựng hiện hữu lân cận. Ở Việt Nam, hệ thống metro phục vụ cho giao thông công cộng đô thị đã bắt đầu được quan tâm xây dựng ở hai thành phố lớn là Thủ đô Hà Nội và TP.HCM. Hiện tại, ở Thủ đô Hà Nội, tuyến hầm metro đầu tiên tuyến đường sắt đô thị số 3 (Nhổn - Ga Hà Nội) đang được xây dựng. Ở TP.HCM, tuyến đường sắt đô thị số 1 (Bến Thành - Suối Tiên) đã xây dựng xong và bắt đầu khai thác từ 12/2024.

Do đó, đã có nhiều nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của việc thi công đường hầm metro đến lún bề mặt đất xung quanh và mức độ

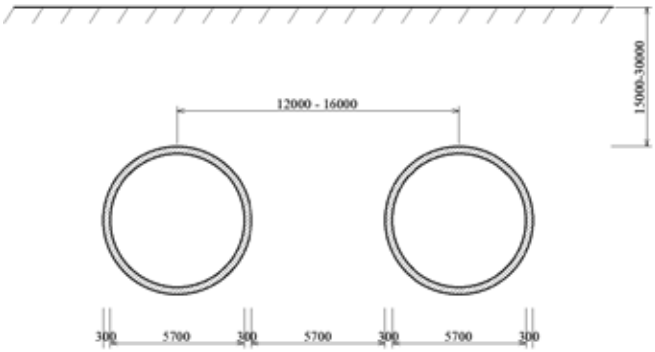
phá hoại của các công trình xây dựng hiện hữu lân cận. Tuy nhiên, ở Việt Nam, hệ thống đường sắt đô thị mới bắt đầu được xây dựng ở hai thành phố lớn là Hà Nội và TP.HCM, nên các nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của việc thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM đến các dạng công trình xây dựng hiện hữu lân cận ở khu vực trung tâm TP Hà Nội vẫn còn rất hạn chế. Mục tiêu của bài báo này là nghiên cứu phỏng đoán lún bề mặt đất cũng như lún của các công trình lân cận để đánh giá mức độ phá hoại của các công trình hiện hữu lân cận khi thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM ở khu vực trung tâm TP Hà Nội.

Nghiên cứu này hy vọng sẽ là tài liệu hữu ích cho các kỹ sư và những người nghiên cứu quan tâm đến việc tính toán thiết kế đường hầm metro bằng phương pháp TBM trong đất mềm, cũng như đánh giá ảnh hưởng của nó đến sự phá hoại của các công trình lân cận hiện hữu, từ đó góp phần nâng cao hiệu quả công tác đầu tư xây dựng các tuyến đường sắt đô thị ở TP Hà Nội cũng như TP.HCM.

2. MÔ PHỎNG SỐ ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA VIỆC THI CÔNG ĐƯỜNG HẦM METRO

Phần này sẽ trình bày việc mô phỏng số quá trình thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM ở khu vực trung tâm TP Hà Nội để phỏng đoán lún bề mặt đất cũng như các công trình hiện hữu lân cận, phục vụ cho việc đánh giá mức độ phá hoại của các dạng công trình hiện hữu lân cận.

Đường hầm metro được khảo sát trong nghiên cứu này là đoạn ngầm, dài khoảng 4 km, từ Ga Kim Mã đến Ga Hà Nội, của tuyến metro số 3, TP Hà Nội. Theo Systra (2011) [1], đoạn ngầm này gồm hai ống hầm song song với nhau, đường kính trong 5.700 mm, dày 300 mm, bằng bê tông cốt thép có cường độ chịu nén thiết kế $f_c' = 40\ MPa$. Khoảng cách từ tim đến tim hai ống hầm thay đổi từ 12 đến 16 m; chiều sâu (khoảng cách từ đỉnh ống hầm đến bề mặt đất) hai ống hầm thay đổi từ 15 đến 30 m. Trong nghiên cứu này, khoảng cách và chiều sâu hai ống hầm sẽ được khảo sát với các giá trị xác định là 14 m và 20 m tương ứng. Hình 1 dưới đây mô tả kích thước vì vị trí của tuyến hầm metro trong nền đất được khảo sát trong nghiên cứu này. Điều kiện địa chất khu vực xây dựng đường hầm sử dụng kết quả của hình trụ lỗ khoan tại ga S10 (Ga Cát Linh).



Hình 1. Kích thước và vị trí của đường hầm metro trong nền đất được khảo sát (đơn vị = mm)

Do hai ống hầm có kích thước mặt cắt ngang không đổi trên suốt chiều dài đường hầm, nên hai ống hầm và nền đất xung quanh dọc theo chiều dài đường hầm sẽ ứng xử như một bài toán biến dạng phẳng. Phần mềm thương mại PLAXIS 2D, version 2024 được sử dụng như một công cụ số cho những phân tích phần tử hữu hạn 2D trong nghiên cứu này.

Theo nghiên cứu của Ou (2006) [2] và Dao (2015) [3] thì phạm vi bị ảnh hưởng của nền đất xung quanh đường hầm metro là khoảng ba lần chiều sâu của đường hầm. Do đó, chiều rộng của nền đất được mô phỏng là 100 m về mỗi phía để tương ứng với chiều sâu khảo sát tối đa của đường hầm là 30 m. Nền đất tốt (đá gốc, đất cát chặt hoặc đất sét ở trạng thái cứng) nằm sâu bên dưới đường hầm có biến dạng rất nhỏ nên được bỏ qua trong mô hình tính toán và được mô phỏng bằng một nền cứng không có biến dạng. Các lớp đất tự nhiên phía trên nền đất tốt được mô phỏng là vật liệu đàn hồi - dẻo lý tưởng theo mô hình Mohr-Coulomb model (MC model) được tích hợp sẵn trong phần mềm Plaxis 2D. Mô hình này có ưu điểm là đơn giản, tiết kiệm bộ nhớ và thời gian tính toán của mô hình số. Do trong suốt quá trình chịu lực, ống hầm bê tông cốt thép có biến dạng rất nhỏ nên nó có thể được mô phỏng là phần tử tấm (Plate element) với mô hình vật liệu ứng xử đàn hồi tuyến tính.

Mô hình MC model là một mô hình ứng xử vật liệu cơ bản của đất, nó diễn tả sự xấp xỉ bậc nhất ứng xử của đất. Mô hình này giả sử mối quan hệ ứng suất-biến dạng của đất là đàn hồi tuyến tính - dẻo lý tưởng, với tiêu chuẩn phá hoại MC. Mô hình MC model bao gồm có 5 thông số đầu vào, đó là góc nội ma sát, lực dính, mô đun đàn hồi, hệ số Possion và góc nở.

Với các lớp đất cát thoát nước tốt sẽ được mô phỏng là vật liệu thoát nước (drained materials) cùng với các thông số cường độ có hiệu. Trong đó, góc nội ma sát có hiệu (ϕ') được xác định trực tiếp từ những thí nghiệm thoát nước trong phòng; lực dính có hiệu (c') được giả sử bằng không, nhưng để tránh sự phức tạp trong quá trình tính toán của phần mềm Plaxis, thì một giá trị rất nhỏ $c' = 0{,}5\ kPa$ được lấy cho các lớp đất cát. Theo khuyến nghị của Plaxis 2D [4], hệ số Possion có hiệu (ν') cho các lớp đất cát được lấy bằng 0,3. Theo nghiên cứu của Hwang và cộng sự [5] và Bolton [6] thì mô-đun đàn hồi có hiệu (E') và góc nở có hiệu (ψ') của các lớp đất cát được xác định theo các công thức dưới đây, trong đó N là số búa xác định được từ thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (thí nghiệm SPT).

$$E' = 2000N\ (kPa) \quad (1)$$

Khi $\phi' \leq 30^o$ thì $\psi' = 0^o$ (2)

Khi $\phi' > 30^o$ thì $\psi' = \phi' - 30^o$ (3)

Ngược lại, với các lớp đất sét khó thoát nước, sẽ được mô phỏng là vật liệu không thoát nước (undrained materials) cùng với các thông số cường độ tổng (Undrained C). Trong đó, góc nội ma sát không thoát nước bằng không ($\phi_u = 0$), lực dính không thoát nước chính là cường độ kháng cắt không thoát nước của đất (S_u), mô-đun đàn hồi không thoát nước (E_u) và hệ số Possion không thoát nước (ν_u) được sử dụng cho phân tích. Thông số S_u được xác định trực tiếp từ thí nghiệm cắt không thoát nước; hệ số ν_u lấy bằng $0{,}495 (\approx 0{,}5)$ để mô phỏng ứng xử không thể nén được của nước và tránh những vấn đề số phức tạp của phần mềm Plaxis. Theo nghiên cứu của Khoiri và Ou [7], Dao (2015) [3], các thông số S_u & E_u có thể được xác định bằng công thức thực nghiệm sau:

$$S_u = 5\text{N (kPa)} \quad (4)$$

$$E_u = 500S_u \quad (5)$$

Từ những phân tích ở trên, ta có bảng các thông số đầu vào của các lớp đất cát và đất sét trong mô hình tính toán như dưới đây.

Bảng 1. Các thông số đầu vào của các lớp đất cát trong mô hình tính toán

Lớp đất	Loại đất	Chiều dày (m)	SPT-N (búa)	ϕ' (độ)	c' (kPa)	E' (kPa)	ν'	ψ' (độ)
Lớp TK1	Cát	2,4	19	32	0,5	38.000	0,3	2
Lớp 5c	Cát	15,2	30	34	0,5	60.000	0,3	4
Lớp 6	Cát	10,0	100	40	0,5	200.000	0,3	10

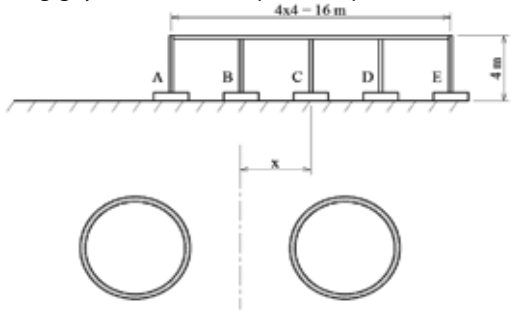
Bảng 2. Các thông số đầu vào của các lớp đất sét trong mô hình tính toán

Lớp đất	Loại đất	Chiều dày (m)	SPT-N (búa)	ϕ_u (độ)	S_u (kPa)	E_u (kPa)	ν_u
Lớp 1a	Sét	5,9	6	0	30	15.000	0,495
Lớp 2b	Sét	5,4	4	0	20	10.000	0,495
Lớp 4a	Sét	4,6	18	0	90	45.000	0,495

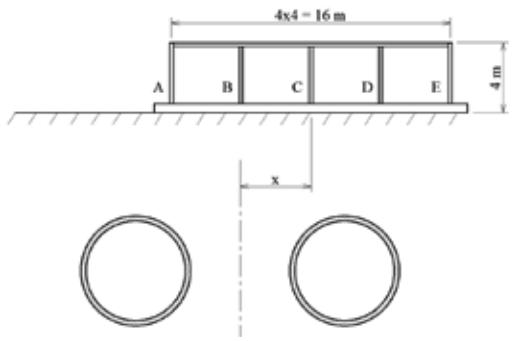
Ống hầm được mô phỏng bằng phần tử tấm, với mô hình vật liệu là đàn hồi tuyến tính. Các thông số đầu vào của phần tử tấm bao gồm mô-đun đàn hồi (E_c), hệ số Possion (ν), chiều dày tấm (t) và trọng lượng đơn vị của tấm (γ_c). Theo ACI 318M-19 [8], hệ số Possion có thể lấy bằng 0,2 và mô-đun đàn hồi có thể xác định từ công thức bên dưới, trong đó f_c' là cường độ chịu nén quy định của bê tông (MPa). Cũng cần chú ý rằng, trọng lượng đơn vị của ống hầm khi khai báo trên phần mềm Plaxis phải được trừ đi trọng lượng đơn vị của đất bởi vì ống hầm được mô phỏng là những phần tử không thể tích (không chiếm chỗ) trong phần mềm Plaxis.

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'}\ (MPa) \quad (6)$$

Để khảo sát phản ứng của các công trình hiện hữu lân cận do việc thi công đường hầm metro, hai kiểu công trình khác nhau sẽ được khảo sát, đó là kiểu công trình trên những móng băng và kiểu công trình trên móng bè. Hình 2 và 3 thể hiện kết cấu của công trình được khảo sát trên những móng băng và móng bè tương ứng. Để làm nổi bật lún của công trình do việc thi công đường hầm metro gây ra, những công trình được khảo sát trong nghiên cứu này là những công trình một tầng trên móng nông. Với những công trình như vậy thì lún công trình gây ra bởi trọng lượng bản thân của chính chúng là không đáng kể. Những công trình này có thể đại diện cho các công trình văn hoá, lịch sử đã tồn tại trước đó trong khu vực trung tâm TP Hà Nội. Với các công trình cao tầng thì lún do trọng lượng bản thân của chính chúng sẽ rất lớn, như thế sẽ gây khó khăn cho việc phân tích những phản ứng của công trình do việc thi công đường hầm metro. Ngoài ra, nền móng của chúng cũng rất phức tạp (quá sâu, móng cọc…) cũng gây khó khăn cho quá trình phân tích.



Hình 2. Kết cấu công trình trên những móng băng

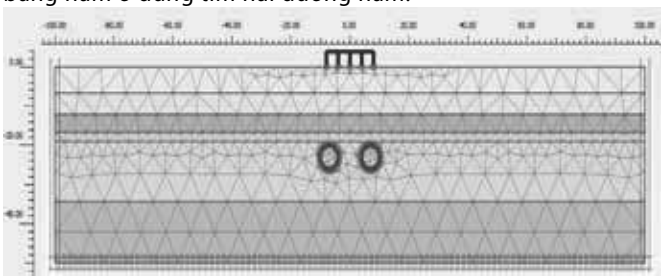


Hình 3. Kết cấu công trình trên móng bè

Như có thể được nhìn thấy từ các hình vẽ trên, những công trình được phân tích ở đây cao 4 m, rộng 16 m và được chia thành 4 khoang bằng nhau. Chiều dày của tường và mái là 0,2 m. Mỗi móng băng có chiều rộng 2,0 m và dày 0,5 m; móng bè có chiều rộng 18,0 m và dày 0,5 m. Cường độ chịu nén quy định của bê tông công trình là $f_c' = 20\ MPa$. Tường, mái và móng của công trình được mô phỏng bằng những phần tử tấm với mô hình vật liệu ứng xử đàn hồi tuyến tính, tương tự như với ống hầm.

Để khảo sát vị trí của công trình có ảnh hưởng như thế nào đến những phản ứng của công trình khi thi công đường hầm metro thì khoảng cách từ tim công trình đến tim hai ống hầm (x) được cho thay đổi theo các giá trị 0, 5, 10, 15, 20, 25 và 30 m. Với những khoảng cách được khảo sát này thì vị trí của công trình có thể thay đổi trên toàn bộ phạm vi lún chủ yếu của nền đất do thi công đường hầm metro gây ra.

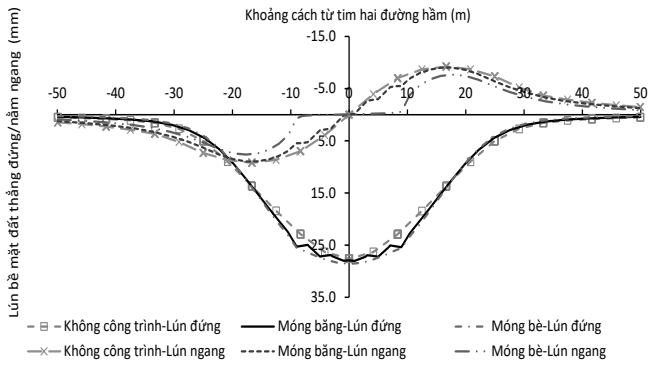
Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mất thể tích (Volume Loss Method) để mô phỏng ảnh hưởng của quá trình thi công đường hầm Metro bằng phương pháp TBM đến lún của nền đất và công trình hiện hữu lân cận. Phương pháp này có ưu điểm là đơn giản, độ tin cậy cao và đặc biệt phù hợp với những dự án đã có số liệu quan trắc lún. Theo các nghiên cứu của Golpasand và cộng sự (2015) [9], Lê và cộng sự (2020) [10], Agarwal và Sarkar (2024) [11] và Martirosyan và công sự (2025) [12] thì hệ số mất mát thể tích (V_l) của những đường hầm metro tiết diện tròn thi công bằng phương pháp TBM trong đất mềm thường thay đổi trong khoảng từ 0,5 đến 2% tùy thuộc vào đặc điểm địa chất, loại máy đào hầm và tay nghề của công nhân. Trong nghiên cứu này, do chưa có số liệu quan trắc lún bề mặt đất nào nên hệ số mất mát thể tích (V_l) được lấy bằng 1% để phân tích. Hình 4 dưới đây thể hiện mô hình lưới phần tử hữu hạn của mô hình số với công trình trên những móng băng nằm ở đúng tim hai đường hầm.



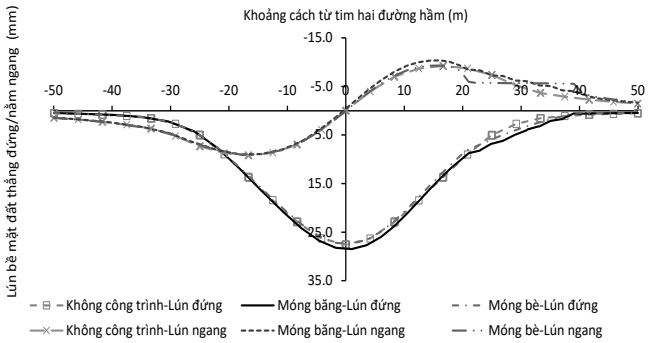
Hình 4. Mô hình lưới phần tử hữu hạn của mô hình số trong nghiên cứu

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các hình dưới đây thể hiện những lún bề mặt đất thẳng đứng và nằm ngang cho các kiểu khác nhau của móng công trình với những giá trị khác nhau của vị trí công trình (x).



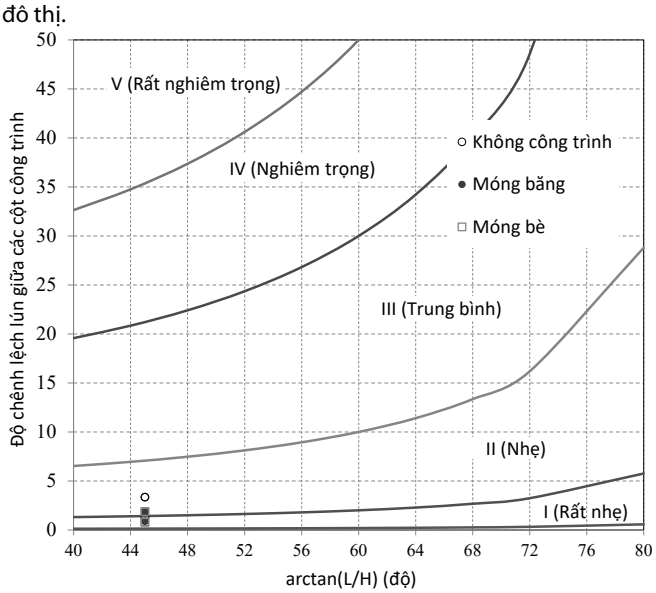
Hình 5. Lún đứng và lún ngang cho những kiểu móng khác nhau khi x = 0 m



Hình 6. Lún đứng và lún ngang cho những kiểu móng khác nhau khi x = 30 m

Từ các kết quả trên ta thấy lún ngang của trường hợp không công trình và công trình trên móng băng khá tương đồng nhau, nhưng lún ngang của bè thì có sự sai khác rõ rệt. Lý do có thể liên quan đến thực tế rằng móng bè là kết cấu liên tục, ngược lại móng băng là kết cấu không liên tục. Như một kết quả, biến dạng ngang tương đối giữa các phần tử trên móng bè bị kiềm chế bởi độ cứng dọc trục của móng bè.

Cũng từ kết quả phân tích lún trên, chúng ta tính được các thông số đánh giá mức độ phá hoại của công trình theo Halim và Wong (2012) [13] như Hình 7 dưới đây. Từ hình vẽ ta thấy mức độ phá hoại công trình được đánh giá ở mức độ I (Rất nhẹ) đến mức độ II (Nhẹ). Điều này cho thấy, nếu hệ số mất mát thể (V_l) tích của công nghệ thi công hầm theo phương pháp TBM nhỏ hơn 1% thì mức độ phá hoại của các công trình hiện hữu lân cận là không đáng kể. Điều này chứng minh công nghệ TBM hoàn toàn khả thi và an toàn, giúp bảo vệ hiệu quả các cấu trúc xây dựng lân cận trong điều kiện đất mềm đô thị.



Hình 7. Đánh giá mức độ phá hoại công trình bằng phương pháp của Halim & Wong (2012)

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phỏng đoán thành công ảnh hưởng của việc thi công đường hầm metro bằng phương pháp TBM đến biến dạng nền đất và công trình hiện hữu tại trung tâm Hà Nội. Kết quả phân tích chỉ ra rằng sự khác biệt về tính liên tục giữa móng bè và móng băng dẫn đến phản ứng biến dạng ngang khác nhau rõ rệt dưới tác động của quá trình đào hầm. Với hệ số mất mát thể tích được kiểm soát dưới 1%, mức độ phá hoại công trình hiện hữu lân cận chỉ dao động từ mức I (Rất nhẹ) đến mức II (Nhẹ) theo phân loại của Halim & Wong (2012). Điều này chứng minh công nghệ TBM hoàn toàn khả thi và an toàn, giúp bảo vệ hiệu quả các cấu trúc xây dựng lân cận trong điều kiện đất mềm đô thị.

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-018.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] SYSTRA. Report on Geotechnical Investigation. Technical Design Report, Line 3 of Ha Noi MRT System (Nhon-Ha Noi Railway Station), Ha Noi, Vietnam, 2011.

[2] CY Ou. Deep Excavation: Theory and Practice. Taylor & Francis, Netherlands, 2006.

[3] SD Dao. Application of numerical analyses for deep excavations in soft ground. PhD dissertation, National Kaohsiung University of Applied Sciences, Taiwan, 2015.

[4] PLAXIS 2D. Reference Manual. Plaxis BV, Amsterdam, the Netherlands, 2024.

[5] RN Hwang, TY Lee, CR Chou, TC Su. Evaluation of Performance of Diaphragm Walls by Wall Deflection Paths. Journal of GeoEngineering, TGS, vol. 7, no. 1, pp. 01-12, Apr 2012, https://doi.org/10.6310/jog.2012.7(1).1.

[6] MD Bolton. The Strength and Dilatancy of Sands. Geotechnique, vol. 36, pp. 65-78, Mar 1986, https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65.

[7] M Khoiri, CY Ou. Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case studies. Computers and Geotechnics, vol. 47, pp. 57-67, Jan 2013, https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.06.009.

[8] ACI 318M-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, USA, 2019.

[9] MRB Golpasand, MR Nikudel, A Uromeihy. Specifying the real value of volume loss (VL) and its effect on ground settlement due to excavation of Abuzar tunnel. Tehran, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 75, no. 2, pp. 485-501, Sep 2015, https://doi.org/10.1007/s10064-015-0788-8.

[10] BT Le, M Kuriki, Q Phan, N Taylor. An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunnelling in Ho Chi Minh city. Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, pp. 305-312, Jan 2020, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_38.

[11] J Agarwal, R Sarkar. Greenfield settlements due to tunnelling using tunnel boring machine (TBM) in layered soils: a parametric study. Sadhana, vol. 49, no. 75, Feb 2024, https://doi.org/10.1007/s12046-023-02425-4.

[12] AZT Martirosyan, II Mustakhimov, IA Tikhoniuk. Numerical Studies for the Application of the Methodology for Volume Loss of Cohesionless (Loose) Soils (VL,LSR) and the Additional Settlement (Smax) During Shield Tunneling. Buildings, MDPI, vol. 15, Dec 2025, https://doi.org/10.3390/buildings15244555.

[13] D Halim, KS.Wong. Prediction of Frame Structure Damage Resulting from Deep Excavation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 138, no. 12, pp. 1530-1536, Dec 2012, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000682.

■ Ngày nộp bài: 11/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 16/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2026

Phân tích ổn định ba chiều mái dốc công trình đặc thù bằng phương pháp cân bằng giới hạn

Three-dimensional stability analysis of slopes in special engineering structures using the limit equilibrium method

> PGS.TS HOÀNG QUỐC LONG*, PGS.TS PHẠM ĐỨC TIỆP, PGS.TS VŨ NGỌC QUANG
Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự
*Email: hoanglong@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Các công trình thao trường huấn luyện là loại hình công trình đặc thù phục vụ nhiệm vụ quân sự, quốc phòng và phòng thủ dân sự. Mái dốc tại các công trình này chịu ảnh hưởng của biến đổi địa hình do đào, tải trọng công trình và phương tiện cơ giới, điều kiện địa chất không đồng nhất, mưa và nước ngầm. Trong nhiều trường hợp, cơ chế phá hoại và mặt trượt mang tính không gian nên phân tích hai chiều (2D) có thể chưa phản ánh đầy đủ trạng thái làm việc thực tế. Bài báo nghiên cứu ổn định mái dốc công trình đặc thù bằng phương pháp cân bằng giới hạn ba chiều (3D LEM), có xét đến hình học mái dốc, đặc trưng cơ lý của đất nền, điều kiện mưa - nước ngầm và tải trọng khai thác. Mô hình cho phép xác định mặt trượt tới hạn, khối trượt và hệ số an toàn. Kết quả nghiên cứu góp phần nâng cao độ tin cậy trong đánh giá, thiết kế và kiểm tra ổn định mái dốc, bảo đảm an toàn, khả năng khai thác và duy trì lâu dài các công trình phục vụ nhiệm vụ quân sự, quốc phòng và phòng thủ dân sự.

Từ khóa: Ổn định mái dốc; phân tích ba chiều; phương pháp cân bằng giới hạn; mặt trượt; công trình đặc thù.

ABSTRACT

Training-ground facilities are specialized structures serving military, national defense and civil defense missions. Slopes at these facilities are affected by terrain changes due to excavation, structural and vehicle loads, geological heterogeneity, rainfall and groundwater conditions. In many cases, the failure mechanism and slip surface are inherently three-dimensional; therefore, two-dimensional (2D) analysis may not fully represent the actual slope behavior. This study investigates the stability of slopes at such specialized facilities using the three-dimensional limit equilibrium method (3D LEM), considering slope geometry, the physical and mechanical properties of the ground, rainfall-groundwater conditions and operational loads. The 3D model enables the determination of the critical slip surface, sliding mass and factor of safety. The results contribute to improving the reliability of slope stability assessment, design and verification, thereby enhancing the safety, serviceability and long-term performance of facilities serving military, national defense and civil defense missions.

Keywords: Slope stability; three-dimensional analysis; Limit Equilibrium Method; slip surface; special-purpose engineering structure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm qua, đối với một số các công trình đặc thù của Quân đội trên toàn quốc đã có thống kê thông qua khảo sát tại các địa bàn về sạt lở mái dốc đất đá, vấn đề này đã ảnh hưởng đến các hoạt động và nhiệm vụ quân sự của quân đội [1]. Ngoài ra, một số vụ điển hình gây thiệt hại về con người và tài sản của quân đội: Sạt lở tại Đoàn Kinh tế - Quốc phòng 337 (Quảng Trị); sạt lở tại Đồn biên phòng cửa khẩu Cha Lo (Quảng Bình)... (Hình 1).

Trong những yếu tố gây nên sạt lở mái dốc có nhiều yếu tố gắn với yếu tố đặc thù của công trình như vị trí xây dựng (phải lựa chọn để đáp ứng yêu cầu về quốc phòng), nằm trên địa bàn khó khăn hoặc có các yếu tố thời tiết phức tạp. Việc đánh giá ổn định mái dốc theo mô hình hai chiều đã có nhiều nghiên cứu, tuy nhiên có thể chưa phản ánh đầy đủ trạng thái làm việc thực tế của mái dốc cho các công trình đặc thù.

Phương pháp cân bằng giới hạn (Limit Equilibrium Method - LEM) là một trong những phương pháp phổ biến để đánh giá ổn định mái dốc dựa trên điều kiện cân bằng lực hoặc mô-men của khối đất có khả năng trượt. Trong phân tích ba chiều, khối đất trượt được xem xét trong không gian và được chia thành các khối có hình dạng phù hợp với địa hình và bề mặt trượt giả định. Đối với mỗi khối đất, các lực tác dụng bao gồm trọng lượng bản thân, áp lực nước lỗ rỗng, tải trọng bên ngoài và lực tương tác giữa các khối được xác định để thiết lập các phương trình cân bằng. Hệ số ổn định được xác định thông qua tỷ số

giữa sức chống cắt huy động và ứng suất cắt gây trượt dọc theo toàn bộ bề mặt trượt. Quá trình tính toán được thực hiện bằng cách tìm kiếm các bề mặt trượt tiềm năng trong không gian ba chiều và xác định bề mặt có hệ số ổn định nhỏ nhất, được xem là bề mặt trượt nguy hiểm nhất. So với phân tích hai chiều, phương pháp LEM ba chiều cho phép xét đến ảnh hưởng của hình dạng không gian của mái dốc, địa hình không đồng nhất và sự biến đổi của bề mặt trượt theo cả ba phương.

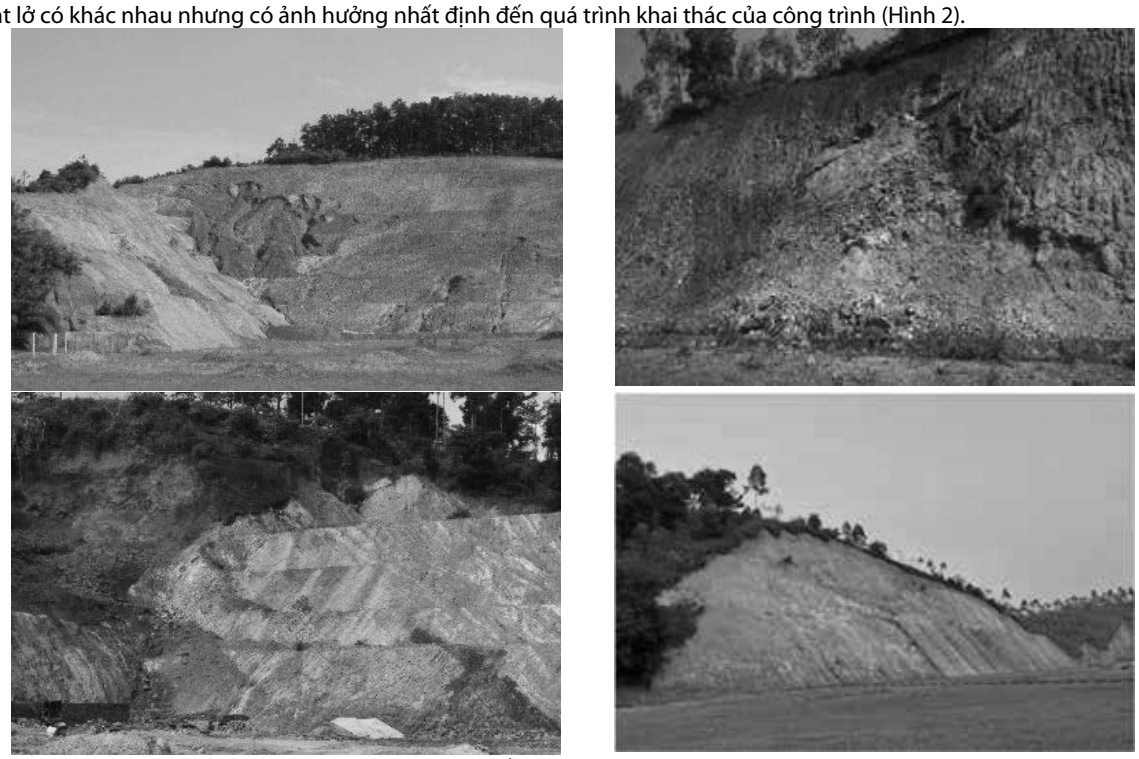
Bài báo này thực hiện tính toán ổn định ba chiều mái dốc công trình đặc thù bằng phương pháp cân bằng giới hạn cho một số vị trí đã khảo sát, từ đó có phân tích đánh giá và đề xuất biện pháp bảo vệ mái dốc.

Hình 1. Hình ảnh sạt lở tại Đoàn Kinh tế Quốc phòng 337

Nguồn: baochinhphu.vn.

2. THỰC TRẠNG SẠT LỞ MÁI DỐC MỘT SỐ CÔNG TRÌNH ĐẶC THÙ

Trên cơ sở nội dung thực hiện theo tài liệu [1] cho thấy: Một số công trình sau khi khảo sát tại thực tế đã có hiện tượng sạt lở mái dốc. Các mức độ sạt lở có khác nhau nhưng có ảnh hưởng nhất định đến quá trình khai thác của công trình (Hình 2).



Hình 2. Một số hình ảnh sạt lở mái dốc công trình trên các địa bàn khác nhau*Nguồn: [1]*

Để đánh giá được mức độ sạt lở, chúng ta thấy rõ mức độ sạt lở của mái dốc phụ thuộc vào nhiều yếu tố [2]:

- Chiều cao mái dốc: Mái dốc càng cao nguy cơ sạt lở càng lớn;
- Độ dốc của mái dốc: Mái dốc có độ dốc lớn thì khả năng sạt lở là cao;
- Điều kiện địa chất;
- Cường độ mưa trung bình theo ngày, theo giờ;
- Lớp phủ bề mặt mái dốc.

Qua các số liệu khảo sát cho thấy mức độ sạt lở mái dốc trên các địa bàn với tính chất công trình là khá nghiêm trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến khai thác công trình.

3. PHƯƠNG PHÁP CÂN BẰNG GIỚI HẠN VỚI MẶT TRƯỢT 3D

Phương pháp cân bằng giới hạn ba chiều (3D LEM) trong PLAXIS LE là sự mở rộng của phương pháp lát cắt trong bài toán 2D. Thay vì chia khối đất trượt thành các lát phẳng [3, 4], khối trượt 3D được chia thành một hệ các cột đất (columns). Điều kiện phá hoại được giả thiết phát triển trên mặt trượt, còn khối đất phía trên mặt trượt được xem như một khối chuyển động. Hệ số an toàn được xác định từ điều kiện cân bằng lực và/hoặc cân bằng mô-men của toàn bộ khối trượt.

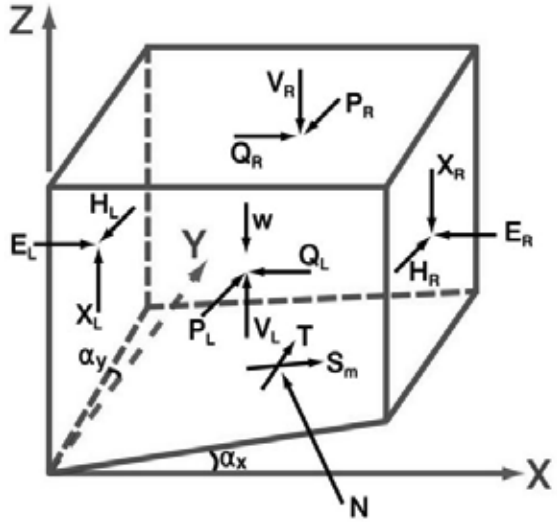
Trong không gian 3D, đường trượt của bài toán 2D được thay bằng một mặt trượt [3, 4]. PLAXIS LE [5] cho phép xét các dạng mặt trượt khác nhau như mặt ellipsoid, các nêm đa mặt phẳng, mặt trượt tổng quát xác định trước hoặc mặt trượt tổ hợp. Với mỗi mặt trượt giả định, phần đất nằm phía trên mặt trượt được phân chia thành các cột; các lực tác dụng lên từng cột được xác định và tổng hợp để kiểm tra trạng thái cân bằng của toàn bộ khối trượt.

Xét một cột đất điển hình (Hình 3), các thành phần lực chính gồm trọng lượng cột W; lực pháp tuyến N và lực cắt huy động S_m tại đáy cột; áp lực nước lỗ rỗng; tải trọng ngoài (nếu có); cùng các lực tương tác giữa các cột theo các phương không gian. Theo tiêu chuẩn Mohr-Coulomb, lực cắt huy động tại đáy cột được xác định theo [5]:

$$S_m = [cA + (N - uA)\tan\varphi] / F_s \quad (1)$$

Trong đó: c và φ là các tham số sức kháng cắt của đất; A là diện tích thực của đáy cột; N là lực pháp tuyến tại đáy cột; u là áp lực nước lỗ rỗng; F_s là hệ số an toàn.

PLAXIS LE triển khai hai nhóm phương pháp cân bằng giới hạn 3D: Phương pháp một phương, trong đó cân bằng được xét chủ yếu theo phương trượt giả định và phương pháp hai phương, trong đó đồng thời xét cân bằng theo phương trượt và phương ngang vuông góc với phương trượt. Đối với phương pháp hai phương, hướng trượt được đưa trực tiếp vào hệ phương trình cân bằng, do đó phù hợp hơn đối với địa hình hoặc khối trượt không đối xứng.



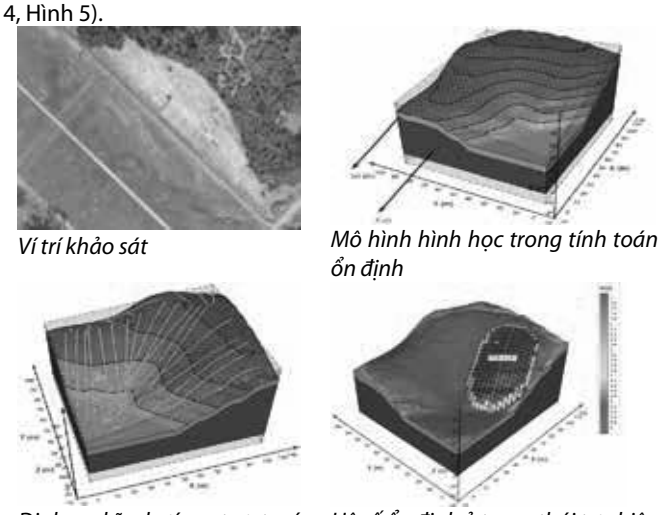
Hình 3. Sơ đồ lực tác dụng lên một cột đất trong phân tích ổn định mái dốc 3D [5]

Với một mặt trượt cho trước, hệ số an toàn được xác định bằng quá trình tính lặp sao cho các điều kiện cân bằng của khối trượt được thỏa mãn. Trong phương pháp GLE 3D, hệ số an toàn theo cân bằng lực và theo cân bằng mô-men được xác định và hội tụ về cùng một giá trị. Các lực tương tác nội bộ giữa các cột triệt tiêu khi xét cân bằng tổng thể của toàn bộ khối trượt.

Để xác định mặt trượt nguy hiểm, chương trình khảo sát nhiều mặt trượt thử khác nhau. Hệ số an toàn được tính cho từng mặt trượt và mặt trượt có hệ số an toàn nhỏ nhất được chọn là mặt trượt tới hạn. Vì vậy, so với phân tích 2D, phương pháp 3D có khả năng xét trực tiếp ảnh hưởng của hình dạng địa hình, sự thay đổi địa tầng theo không gian, chiều rộng hữu hạn của khối trượt và hiệu ứng biên theo phương ngang.

4. TÍNH TOÁN VÀ PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH MÁI DỐC CÔNG TRÌNH ĐẶC THÙ BẰNG PHƯƠNG PHÁP CÂN BẰNG GIỚI HẠN

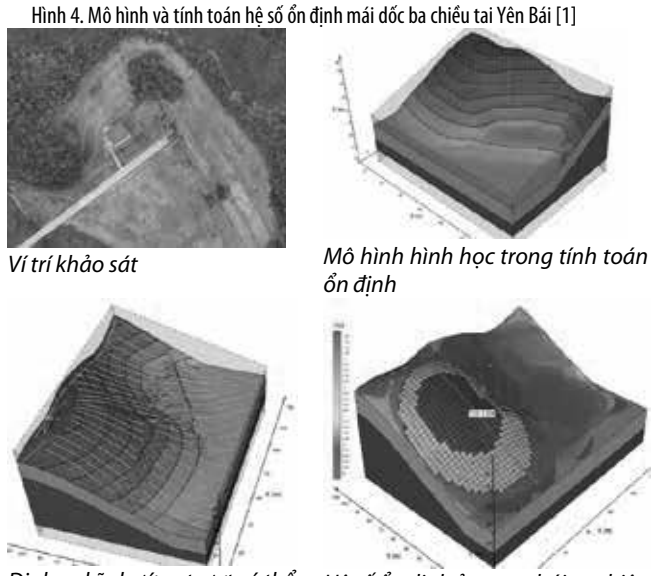
Để tính toán và phân tích được ổn định mái dốc, nhóm tác giả đã tiến hành khảo sát các số liệu đầu vào như xây dựng địa hình số từ dữ liệu bay UAV, khoan địa chất xác định các chỉ tiêu cơ lý của đất đá được thí nghiệm và tính toán dự báo lượng mưa cho một số vị trí. Từ các dữ liệu trên tính toán bằng phần mềm PLAXIS 3D LE để xác định hệ số ổn định mái dốc ba chiều và dự báo nguy cơ sạt lở (Hình 4, Hình 5).



Ví trí khảo sát — *Mô hình hình học trong tính toán ổn định*

Định nghĩa hướng trượt có thể xuất hiện — *Hệ số ổn định ở trạng thái tự nhiên*

Hình 4. Mô hình và tính toán hệ số ổn định mái dốc ba chiều tai Yên Bái [1]



Ví trí khảo sát — *Mô hình hình học trong tính toán ổn định*

Định nghĩa hướng trượt có thể xuất hiện — *Hệ số ổn định ở trạng thái tự nhiên*

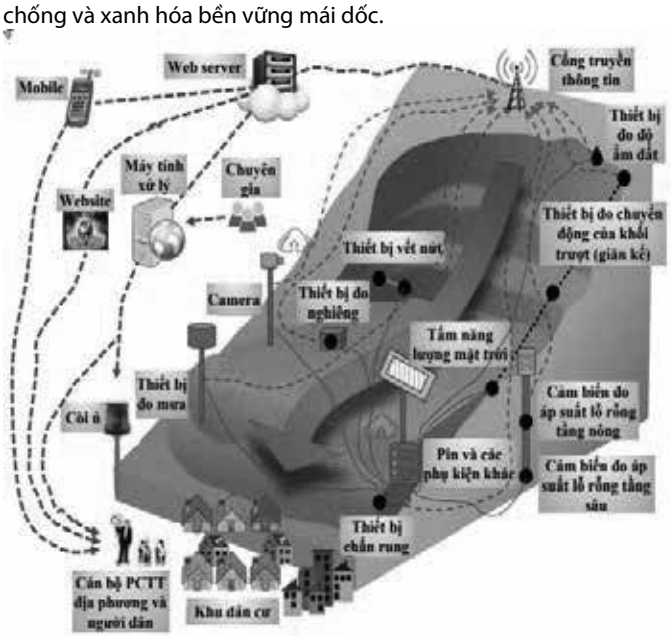
Hình 5. Mô hình và tính toán hệ số ổn định mái dốc ba chiều tại Bắc Kạn [1]

Kết quả tính toán cho phép đánh giá trạng thái ổn định hiện tại của mái dốc và dự báo sự thay đổi ổn định dưới ảnh hưởng của lượng mưa. Hệ số ổn định FS tính toán tương đối thấp, dao động khoảng

1,1 - 1,4. Đặc biệt, mô hình ba chiều cho phép quan sát rõ hình dạng, phạm vi và vị trí của khối trượt tiềm năng trong không gian, qua đó xác định được vùng có nguy cơ mất ổn định cao nhất trong khu vực khảo sát. Kết quả này là cơ sở để khoanh vùng nguy hiểm và đề xuất các giải pháp gia cố, phòng ngừa phù hợp.

5. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ỔN ĐỊNH MÁI DỐC CÔNG TRÌNH ĐẶC THÙ

Đối với các mái dốc cho một số công trình đặc thù không thể áp dụng các giải pháp bê tông hóa hay cứng hóa mái dốc do tính chất yêu cầu của mái dốc. Trong các giải pháp phù hợp nhóm đề xuất: Xây dựng hệ thống cảnh báo sớm để có giải pháp chủ động phòng chống và xanh hóa bền vững mái dốc.



Mô hình tổng hợp về hệ thống quan trắc, giám sát, dự báo và cảnh báo sớm sạt lở mái dốc

Trồng cỏ chống sạt lở mái dốc

Hình 6. Một số giải pháp phòng chống sạt lở mái dốc công trình đặc thù

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Mái dốc tại các công trình quốc phòng và thao trường huấn luyện có điều kiện hình học, tải trọng tác động và chế độ khai thác khác biệt so với công trình thông thường do tính đặc thù. Thực trạng sạt lở tại các địa bàn trọng điểm thời gian qua đã có ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệm vụ quốc phòng.

Phân tích ổn định theo mô hình hai chiều (2D) truyền thống chưa phản ánh đầy đủ trạng thái ứng suất thực tế và cơ chế phá hoại không gian của mái dốc phức tạp. Việc áp dụng phương pháp cân bằng giới hạn ba chiều (3D LEM) thông qua phần mềm PLAXIS 3D LE giúp xác định chính xác hình học không gian, thể tích khối trượt và tìm kiếm bề mặt trượt nguy hiểm nhất.

Kết quả tính toán thử nghiệm tại các vị trí thực tế (Yên Bái, Bắc Kạn) cho thấy hệ số ổn định mái dốc ở trạng thái tự nhiên và dưới tác động của mưa dao động ở mức khá thấp (FS = 1,1-1,4) tiềm ẩn nguy cơ sạt lở cao khi khai thác.

Cần tiếp tục hoàn thiện mô hình tính toán ổn định 3D dưới tác động của tải trọng động (phương tiện cơ giới, huấn luyện) và nghiên cứu ảnh hưởng của chu kỳ mưa cực đoan do biến đổi khí hậu đến sức chống cắt của đất đối với mái dốc của các công trình đặc thù.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vũ Ngọc Quang và nnk. Điều tra, khảo sát thực trạng, xác định các giải pháp ứng phó, giảm thiểu tác động của các yếu tố môi trường gây sạt lở đất ảnh hưởng đến công trình quân sự ở các khu vực trọng điểm có nguy cơ cao. Nhiệm vụ cấp BQP, Hà Nội, 2022.

[2] Vũ Công Ngữ, Nguyễn Thái. Cơ học đất. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2003.

[3] Цытович Н. А. Механика грунтов: полный курс: учебное пособие для студентов гидротехнических и строительных специальностей высших учебных заведений. - М.: Госстройиздат. 5-е изд, 2014.

[4] Terzaghi K. Mechanisms of landslides. Geological Society of America, Berkley, 2015.

[5] Bentley Systems. PLAXIS LE - Slope Stability: 2D/3D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis - Theory Manual. Bentley Systems, Inc., 2024.

■Ngày nhận bài: 22/7/2026 ■Ngày sửa bài: 12/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/8/2026

Các yêu cầu kỹ thuật đối với hệ thống con vận hành đảm bảo vận hành liên thông trong mạng lưới đường sắt đô thị Hà Nội

Technical specifications for interoperability of subsystems operation within the Hanoi urban railway network

> TS NGUYỄN THỊ HOÀI AN
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: annth@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tổng kết, phân tích định hướng phát triển mạng lưới đường sắt đô thị (ĐSĐT) tầm nhìn 100 năm của TP Hà Nội với sự cấp thiết phải xây dựng bộ thông số kỹ thuật chung cho toàn bộ hệ thống ĐSĐT đảm bảo toàn mạng lưới có khả năng vận hành liên thông, tiết kiệm tài nguyên, hiệu quả trong vận hành và chiến lược phát triển công nghiệp đường sắt. Với cấu trúc tổng thể các hệ thống con cơ bản của mạng lưới ĐSĐT, bài báo đưa ra kết quả nghiên cứu, đề xuất các yêu cầu kỹ thuật cơ bản, nội dung và cấu trúc các hạng mục thiết yếu của bộ thông số kỹ thuật chung của hệ thống con Vận hành, một trong tám hệ thống con cốt lõi của mạng lưới cần phải được thiết lập ngay từ khi triển khai xây dựng tuyến.

Từ khóa: Đường sắt đô thị; đường sắt; vận hành liên thông; tiêu chuẩn kỹ thuật; quy chuẩn.

ABSTRACT

The article analyzes the development orientation of Hanoi's urban railway network with a 100-year vision, emphasizing the imperative need to establish a common technical specifications for the Hanoi urban rail network to ensure interoperability, resource conservation, operational and economic efficiency, and railway industry development strategy the development. Based on the overall structure of the fundamental subsystems of the network, the paper presents research findings and proposes basic technical requirements, contents, and structures of common technical specifications of the Operation subsystem-one of the eight core subsystems of the network that must be established right from the deployment and construction phase of the line.

Keywords: Urban rail transit; railways; interoperability; regulation; technical standard.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

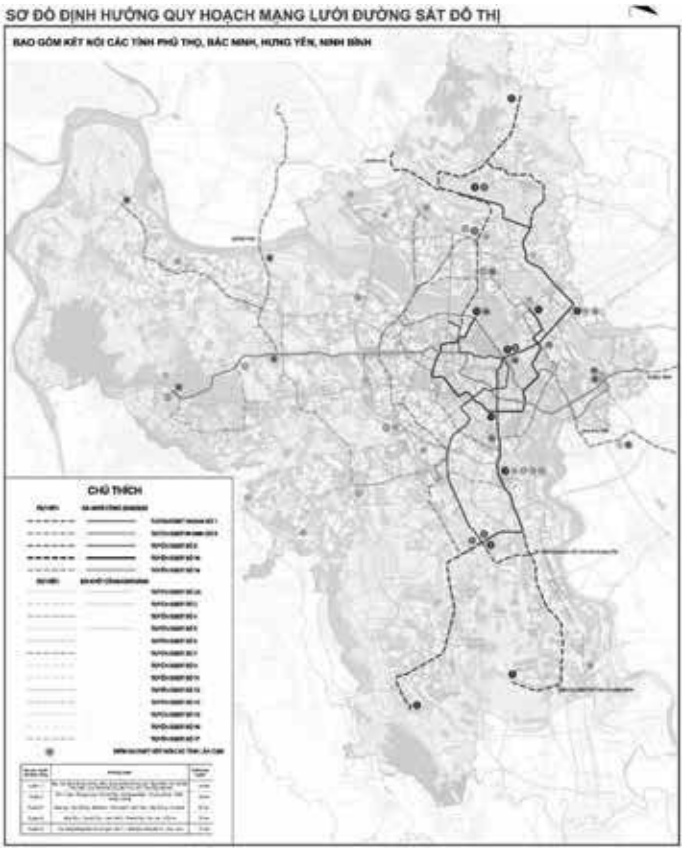
Theo Quy hoạch tổng thể Thủ đô Hà Nội tầm nhìn 100 năm [1], kế thừa từ Nghị quyết 188/2025 của Quốc hội cùng các quy hoạch đã được phê duyệt, mạng lưới ĐSĐT sẽ là xương sống của phát triển đô thị bền vững, theo mô hình TOD, góp phần giảm ùn tắc, hạn chế ô nhiễm môi trường và nâng cao chất lượng sống cho người dân. Mạng lưới ĐSĐT tại Hà Nội được quy hoạch gồm 18 tuyến, được triển khai theo lộ trình 3 bước, trong đó ĐSĐT nội vùng 979 km như sau [4]:

- Đến năm 2035 mạng lưới gồm 6 tuyến (~400 km): gồm hai tuyến nhanh và các hành lang hướng tâm phục vụ khu đô thị mới, tăng kết nối tới các hạt nhân,
- Đến năm 2045 với tổng số 10 tuyến (~800 km): gồm hai tuyến vành đai kép, tăng dịch vụ dọc sông Hồng và khu phố cổ,
- Đến năm 2065: hoàn thiện ở quy mô khoảng 1.200 km, hoàn thiện vành đai thứ ba, tăng mật độ tuyến phục vụ các khu đô thị mới.

Hai tuyến ĐSĐT hiện nay tại Hà Nội dù cùng chạy trên khổ đường 1.435 mm với một số đặc tính kỹ thuật chung cơ bản khác, nhưng các đoàn tàu không thể vận hành liên tuyến, Depot được xây dựng riêng cho mỗi tuyến. Về mặt chiến lược kỹ thuật và phát triển, vận hành độc lập các tuyến ĐSĐT sẽ dẫn đến nhiều bất cập như:

- Các đoàn tàu là độc lập, không thể vận hành chung và điều chuyển tàu giữa các tuyến khi cần thiết. Nhiều trường hợp sẽ có tuyến thừa tàu, có tuyến thiếu tàu.
- Số lượng Depot lớn gây lãng phí nguồn lực về thiết bị, ứng dụng kỹ thuật công nghệ, nhà xưởng, nhân sự Depot… dù hạng mục công việc tương tự nhau.
- Lãng phí quỹ đất thành phố để xây dựng Depot cho mỗi tuyến.
- Rất khó khăn khi cần thay đổi, nâng cấp, áp dụng công nghệ mới của đường sắt vào các tuyến trong các giai đoạn sau này.
- Khó khăn trong định hướng phát triển công nghiệp đường sắt tự chủ và tập trung.

Chính phủ Việt Nam cũng đã nhấn mạnh sự cần thiết xây dựng và áp dụng Bộ thông số kỹ thuật chung cho ĐSĐT đảm bảo tính đồng bộ, hệ thống, liên thông, tiên tiến, hiện đại [1, 2]. Bộ Xây dựng cũng có hướng dẫn Bộ thông số kỹ thuật dùng chung là cơ sở để phát triển các TSI cho mỗi hệ thống con cụ thể sau này [3].



Hình 1. Sơ đồ định hướng quy hoạch mạng lưới ĐSĐT Hà Nội *(Nguồn HUPI-7/2026)*

2. KHẢ NĂNG VẬN HÀNH LIÊN THÔNG TRONG MẠNG LƯỚI ĐSĐT

Khả năng vận hành liên thông (interoperability) là ***"khả năng của một hệ thống đường sắt cho phép các đoàn tàu có thể vận hành an toàn và liên tục theo mức hiệu quả vận hành yêu cầu"*** [7, 8]. Lập kế hoạch mạng lưới giao thông ĐSĐT vận hành liên thông cần dựa trên bố cục mạng lưới đô thị, mục tiêu tốc độ của tuyến, lựa chọn tàu, chế độ vận hành.... Các yêu cầu về khả năng vận hành liên thông phải được xác định sớm trong giai đoạn lập kế hoạch để đạt được hiệu quả vận hành cao nhất. Tận dụng lợi thế của các tuyến vận hành liên thông, sử dụng chia sẻ tài nguyên làm giả định cơ bản và đạt được hiệu quả chi phí, sẽ xây dựng kế hoạch mạng lưới liên thông dựa trên chia sẻ tài nguyên.

Vận hành liên thông gồm 4 mức độ sau:

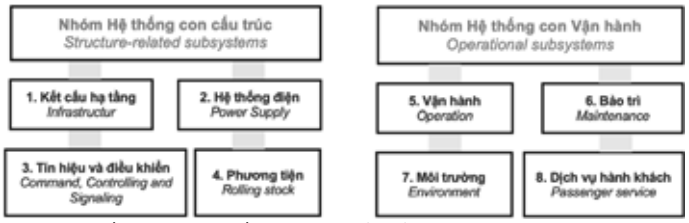
(1) Không có vận hành liên thông, mỗi tuyến hoạt động độc lập với Depot, hạ tầng và đoàn tàu riêng biệt.

(2) Mức độ vận hành liên thông thấp cho phép các di chuyển tàu không thường xuyên để bảo trì, với mức hạn chế chia sẻ hạ tầng.

(3) Mức độ vận hành liên thông trung bình hỗ trợ các di chuyển tàu hàng ngày đến các Depot chung, nhưng đoàn tàu vẫn chỉ sử dụng cho từng tuyến cụ thể.

(4) Mức độ vận hành liên thông cao cho phép chia sẻ toàn bộ hạ tầng và đoàn tàu, giúp vận hành thông suốt và nâng cao tiện ích cho hành khách. Việc đạt được mức vận hành liên thông cao giúp tối ưu hóa nguồn lực, giảm chi phí và tăng tính linh hoạt cho hệ thống.

Về mặt kỹ thuật, chức năng và giao diện trong hệ thống ĐSĐT, bộ thông số kỹ thuật đối với mạng lưới ĐSĐT Hà Nội cần đảm bảo vận hành an toàn liên tuyến mà không gây trở ngại gì về mặt kỹ thuật, tạo gắn kết, hiệu quả và thân thiện đối với hành khách trên toàn bộ mạng lưới ĐSĐT. Cấu trúc các hệ thống con được đề xuất như Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc bộ thông số kỹ thuật (TSI) đảm bảo vận hành liên thông trong mạng lưới ĐSĐT Hà Nội [5 - 7]

3. CÁC THÔNG SỐ KỸ THUẬT CHUNG CỦA HỆ THỐNG CON VẬN HÀNH

Hệ thống con vận hành là một thành phần quan trọng trong hệ thống ĐSĐT. Tổ chức vận hành thông suốt trên toàn mạng lưới các tuyến ĐSĐT phải có tính hệ thống, liên quan đến nhiều điều kiện khác nhau, như ranh giới tuyến, kết cấu hạ tầng, công suất điện kéo, tín hiệu và điều khiển, thông tin liên lạc, cửa chắn ke ga và đoàn tàu, bảo trì, đào tạo và các lĩnh vực liên quan khác. Do vậy, cần quản lý vận hành theo yêu cầu kỹ thuật, tiêu chuẩn thống nhất để đạt được hiệu quả vận hành liên thông.

Thông số kỹ thuật về khả năng vận hành liên thông đối với hệ thống con Vận hành (Technical Specifications for Interoperability of Operation - TSI-O) nhằm quy định các yêu cầu thiết yếu đối với hệ thống con 'Vận hành", thiết lập các nguyên tắc vận hành cơ bản và vận hành chung cho hệ thống ĐSĐT của Hà Nội. TSI-O này còn quy định các yêu cầu về giao diện để phối hợp thực hiện giữa các đơn vị quản lý cơ sở hạ tầng (IM) và các doanh nghiệp vận hành đường sắt (RU) (nếu có yêu cầu).

TSI-O cần đề cập đến các quy trình và thủ tục, các yếu tố vật lý của phương tiện và công trình cố định ĐSĐT đóng vai trò quan trọng đối với chức năng vận hành trong phạm vi của TSI này, các yêu cầu áp dụng cho nhân sự thực hiện những nhiệm vụ trọng yếu về an toàn.

Về nguyên tắc, doanh nghiệp RU và đơn vị IM cần phải đảm bảo rằng tất cả các yêu cầu của TSI-O này là một phần phù hợp trong hệ thống quản lý an toàn (SMS).

3.1. Các yêu cầu chung

Đơn vị vận hành phải vận hành hệ thống ĐSĐT theo các quy tắc rõ ràng và cụ thể. Các quy tắc vận hành phải bao gồm tất cả các hoạt động cần thiết cho: vận hành tàu trong điều kiện bình thường và điều kiện giảm cấp; phân công nhiệm vụ cho nhân viên vận hành chuyên trách và có đủ năng lực, gồm công tác đào tạo lý thuyết và thực hành cho họ; hỗ trợ hành khách trong trường hợp gián đoạn vận hành hoặc tình huống khẩn cấp, và tổ chức cứu hộ hành khách với sự phối hợp của các lực lượng ứng phó khẩn cấp bên ngoài; xây dựng kế hoạch an toàn và an ninh với sự phối hợp của các cơ quan chức năng bên ngoài (lực lượng cứu hỏa, cảnh sát, v.v.).

Việc tuân thủ các quy tắc vận hành đã được thiết lập phải được giám sát bởi nhân sự có đủ năng lực do RU chỉ định.

Các sự cố và trục trặc của thiết bị thuộc kết cấu hạ tầng, phương tiện và các hệ thống con khác phải được báo cáo ở mức độ cần thiết để đưa ra các quyết định vận hành phù hợp tại các vị trí có nhân sự trực (ví dụ: buồng lái, trung tâm điều hành...).

Các thiết bị không hoạt động hoặc hoạt động không đúng chức năng trong hệ thống và trên phương tiện, nếu có nguy cơ gây mất an toàn khi vận hành, phải được ngừng sử dụng và thực hiện các biện pháp đảm bảo an toàn nếu cần thiết.

Phải đảm bảo rằng nhân viên phụ trách vận hành và giám sát hoạt động chạy tàu được ủy quyền và luôn sẵn sàng thực hiện các hành động phù hợp, kể cả trong các tình huống khẩn cấp.

Tùy thuộc vào môi trường của hệ thống, việc vận hành tàu phải được thực hiện theo nguyên tắc:

- ĐSĐT phải được vận hành tách biệt khỏi giao thông đường bộ, đặc biệt là thông qua việc triển khai tuyến ĐSĐT không giao cắt một phần hoặc toàn bộ.

- Việc vận hành tàu phải tuân thủ các luật, quy định hiện hành có liên quan.

- ĐSĐT phải được vận hành bằng hệ thống tín hiệu và/hoặc hệ thống điều khiển tàu tự động, tùy thuộc vào cấp độ tự động hóa, trừ những khu vực phải vận hành bằng quan sát.

3.2. Các yêu cầu kỹ thuật cơ bản đối với hệ thống con vận hành

Bộ thông số kỹ thuật TSI-O phải tuân thủ các yêu cầu thiết yếu sau:

- *An toàn (Safety):* Việc thống nhất các quy tắc vận hành mạng lưới cũng như trình độ chuyên môn của lái tàu, nhân viên trên tàu và nhân viên tại các OCC phải đảm bảo an toàn trong quá trình vận hành.

Các quy trình và chu kỳ bảo trì, công tác đào tạo và trình độ chuyên môn của nhân viên bảo trì và nhân viên OCC, cũng như hệ thống đảm bảo chất lượng do các đơn vị vận hành thiết lập tại các OCC và bảo trì, phải đảm bảo duy trì mức độ an toàn cao.

- *Độ tin cậy và tính sẵn sàng (Reliability and Availability):* Các quy trình và chu kỳ bảo trì, công tác đào tạo và trình độ chuyên môn của nhân viên bảo trì và nhân viên OCC, hệ thống đảm bảo chất lượng tại các OCC và bảo trì, phải đảm bảo duy trì mức độ tin cậy và tính sẵn sàng cao của hệ thống.

- *Khả năng tương thích kỹ thuật (Technical Compatibility):* Việc thống nhất các quy tắc vận hành mạng lưới cũng như trình độ chuyên môn của lái tàu, nhân viên trên tàu và người quản lý điều hành chạy tàu phải đảm bảo hiệu quả vận hành trên toàn mạng lưới có tính đến khác biệt dịch vụ vận tải nếu có.

- *Khả năng tiếp cận (Accessibility):* Cần thiết lập các quy tắc vận hành bao gồm những chức năng cần thiết đảm bảo tiếp cận cho người suy giảm khả năng vận động.

- *Sức khỏe (Health):* Các hệ thống kỹ thuật và quy trình được sử dụng tại các OCC phải đảm bảo vận hành an toàn cho hệ thống con và không gây nguy hại đến sức khỏe và an toàn.

- *Bảo vệ môi trường (Environmental protection):* Các hệ thống kỹ thuật và quy trình được sử dụng tại các trung tâm bảo trì không được vượt quá mức độ ảnh hưởng cho phép đối với môi trường xung quanh.

Các hạng mục cụ thể được mô tả như trong Hình 3. Trong TSI-O này cần đảm bảo có các nội dung sau:

(1) Phạm vi cho hệ thống con 'Vận hành';

(2) Quy định các yêu cầu chính và các giao diện với các hệ thống con liên quan khác;

(3) Thiết lập các thông số kỹ thuật và chức năng mà hệ thống con mục tiêu và các giao diện bắt buộc với các hệ thống con khác. Nếu cần thiết, các thông số kỹ thuật này có thể thay đổi tùy theo mục đích sử dụng của hệ thống con;

(4) Xác định các thành phần liên thông và các giao diện được bao phủ bởi các thông số kỹ thuật;

(5) Nêu rõ, trong từng trường hợp được xem xét, các quy trình nào sẽ được sử dụng để đánh giá sự phù hợp hoặc tương thích để sử dụng của các thành phần liên thông;

(6) Chỉ ra chiến lược thực hiện TSI-O. Đặc biệt, cần quy định các giai đoạn phải hoàn thành và các yếu tố có thể áp dụng để thực hiện TSI-O;

(7) Chỉ ra các bằng cấp chuyên môn cũng như các điều kiện an toàn và sức khỏe nghề nghiệp cần thiết cho nhân viên liên quan trong việc vận hành và bảo trì hệ thống con, cũng như cho việc thực hiện TSI;

(8) Chỉ ra các quy định áp dụng cho các hệ thống con và phương tiện hiện có không tuân thủ TSI, đặc biệt là trong trường hợp nâng cấp và làm mới;

(9) Chỉ ra các thông số của phương tiện và các hệ thống con cố định cần được doanh nghiệp RU kiểm tra và các quy trình áp dụng để kiểm tra các thông số đó sau khi phương tiện được cấp phép vận hành, nhằm đảm bảo khả năng tương thích giữa phương tiện và các tuyến đường vận hành.

Hình 3. Bộ thông số kỹ thuật vận hành liên thông cho Hệ thống con Vận hành TSI-O

4. KẾT LUẬN

Giải pháp kỹ thuật đối với các hệ thống con đảm bảo khả năng vận hành liên thông trong toàn bộ mạng lưới ĐSĐT là tất yếu và cần thiết để đạt được hiệu quả vận hành, lợi ích công nghệ và hài hòa chi phí trong phát triển công nghiệp đường sắt của TP Hà Nội. Hệ thống con Vận hành đóng vai trò quan trọng ngay từ lúc bắt đầu triển khai đến hết vòng đời của tuyến ĐSĐT. Bộ thông số kỹ thuật Vận hành cần thiết lập các yếu tố kỹ thuật liên quan đến nhân viên đường sắt, các thủ tục và quy trình vận hành, vận hành đoàn tàu, yêu cầu về năng lực chuyên môn và sức khỏe đối với nhân lực ĐSĐT, đảm bảo vận hành an toàn với độ tin cậy, tính sẵn sàng và tương thích kỹ thuật cao. TSI-O cần phải được áp dụng đồng bộ trên toàn mạng lưới ngay từ thời điểm chuẩn bị dự án ĐSĐT để đảm bảo tính liên thông trong vận hành toàn bộ mạng lưới ĐSĐT của Hà Nội sau này.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-KT-001TĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Nghị quyết số 188/2025/QH15 ngày 19/02/2025.

[2] Văn phòng Chính phủ. Văn bản số 6696/VPCP-CN ngày 10/7/2026 về áp dụng và xây dựng hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật đường sắt đô thị.

[3] Bộ Xây dựng. Văn bản số 11410/BXD-KHCNMT&VLXD ngày 23/7/2026 về hướng dẫn Bộ thông số kỹ thuật dùng chung.

[4] UBND TP Hà Nội. Quyết định số 2512/QĐ-UBND ngày 13/5/2026 về phê duyệt Quy hoạch tổng thể Thủ đô Hà Nội tầm nhìn 100 năm.

[5] Funktionale Anforderungen und Lösungskonzept zu technischen Normen der vietnamesischen Eisenbahn. Nguyễn Thị Hoài An - TU Dresden, 2011.

[6] Nguyễn Thị Hoài An. Báo cáo tại Hội thảo về Phát triển hệ thống ĐSĐT Hà Nội và TP.HCM, Hà Nội, 17 - 19/01/2024.

[7] Nguyễn Thị Hoài An. Nghiên cứu một số giải pháp kỹ thuật đảm bảo khả năng vận hành liên thông trong mạng lưới đường sắt đô thị Hà Nội. Tạp chí Xây dựng, số 4, tr. 324-326, 2025.

[8] Sắc lệnh của Ủy ban châu Âu 96/48/EC; 2016/797/EU.

■Ngày nhận bài: 20/8/2026 ■Ngày sửa bài: 30/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/9/2026

Khả năng và giới hạn của phương pháp so sánh ảnh Sentinel-1 trước - sau trong kiểm kê ngập lụt: Kiểm chứng qua 9 đợt lũ tại Hà Tĩnh, giai đoạn 2015 - 2023

Capability and limitations of bi-temporal Sentinel-1 change detection for flood inventory mapping: Validation against 9 documented flood events in Ha Tinh province, 2015 - 2023

> NGUYỄN ANH TUẤN[1,*], TRẦN VŨ VĂN HÒA[1], PHAN QUỐC CƯỜNG[1], LÂM BẢO HOÀNG[2], ĐẶNG THÁI SƠN[2], TRƯƠNG THANH TÙNG[1]

[1]Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh

[2]Sở Xây dựng tỉnh Hà Tĩnh

[*]Email: tuanna@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Ảnh radar Sentinel-1 được dùng rộng rãi để lập bản đồ ngập lụt nhờ khả năng xuyên mây, song phương pháp so sánh ảnh trước - sau hiếm khi được kiểm chứng ngược với các đợt lũ đã ghi nhận. Nghiên cứu xử lý 109 ảnh thuộc 35 đợt đỉnh lũ tại Hà Tĩnh giai đoạn 2015 - 2023 và đối chiếu với 9 đợt lũ trong hồ sơ thủy lợi. Ngưỡng kinh nghiệm -15 dB cho 1.614 km^2 mặt nước, gấp 8 lần diện tích thực 196,9 km^2; thuật toán Otsu thất bại ở quy mô cấp tỉnh vì biểu đồ tần suất không có dạng hai đỉnh. Hai phương pháp hiệu chuẩn độc lập cùng hội tụ về -21 dB. Bộ kiểm kê xác định 564,7 km^2, tức 9,46% diện tích tỉnh, từng ngập ít nhất 1 lần, có cao độ trung vị 3,13 m so với 81,22 m của phần còn lại. Tuy vậy, chỉ hai trong chín đợt lũ ghi nhận được phát hiện. Nguyên nhân nằm ở dữ liệu chứ không ở thuật toán: tỷ lệ ô vùng thấp có tán xạ ngược giảm quá 3 dB chỉ đạt 0,0 - 7,8% ở các đợt bỏ sót, so với 33,4 - 34,5% ở các đợt phát hiện được; 4 trong 35 cặp ảnh có nội dung trùng khít. Bộ kiểm kê vì vậy có độ chính xác cao nhưng độ bao phủ thấp, cần kiểm chứng ngược với sự kiện thực tế trước khi dùng cho mô hình hóa nguy cơ.

Từ khóa: Sentinel-1; kiểm kê ngập lụt; hiệu chuẩn ngưỡng; Hà Tĩnh; kiểm chứng độc lập.

ABSTRACT

Sentinel-1 radar is widely used for flood mapping owing to its cloud-penetrating capability, yet bi-temporal change detection is seldom validated against documented flood events. This study processed 109 scenes covering 35 flood-peak events in Ha Tinh province during 2015 - 2023 and compared the results with 9 floods recorded in hydraulic archives. The empirical threshold of -15 dB yielded 1,614 km^2 of open water, 8 times the actual 196.9 km^2; the Otsu algorithm failed at provincial scale because the backscatter histogram is not bimodal. 2 independent calibrations converged on -21 dB, consistent with VH polarisation. The inventory identified 564.7 km^2, or 9.46% of the province, as inundated at least once, with a median elevation of 3.13 m against 81.22 m elsewhere. Nevertheless, only 2 of the 9 documented events were detected, and 2 of 5 major floods. The omissions arose from the data rather than the algorithm: the proportion of low-lying cells with backscatter decreasing by more than 3 dB was 0.0 - 7.8% for missed events against 33.4 - 34.5% for detected ones, and 4 of 35 image pairs proved identical. The inventory therefore exhibits high precision but low recall, and should be validated against documented events before use in susceptibility modelling.

Keywords: Sentinel-1; flood inventory; threshold calibration; Ha Tinh; independent validation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngập lụt là thiên tai gây thiệt hại lớn nhất tại Bắc Trung Bộ, nơi địa hình dốc, sông ngắn và mùa mưa tập trung khiến lũ lên nhanh, rút chậm. Tỉnh Hà Tĩnh nằm trọn trong khu vực này với diện tích 5.968,6 km^2. Trận lũ tháng 10/2020 làm 118 trong 216 xã, phường khi đó bị ngập, thiệt hại vượt 5.300 tỷ đồng; trận lũ lịch sử tháng 10/2010 đưa mực nước trạm Chu Lễ lên 16,56 m, vượt báo động 3 là 3,06 m. Mọi mô hình nguy cơ ngập lụt đều cần một bộ kiểm kê tin cậy làm dữ liệu nhãn.

Ảnh quang học không thu nhận được bề mặt khi có mây, mà mây luôn xuất hiện đúng lúc xảy ra lũ. Ảnh radar khắc phục hạn chế này; vệ tinh Sentinel-1 hoạt động từ 2014 với chu kỳ lặp 6 - 12 ngày và độ phân giải 10 m đã thành nguồn phổ biến nhất [1]. Nguyên lý tách nước dựa trên hiện tượng mặt nước phẳng phản xạ gương làm tán xạ ngược giảm mạnh so với đất liền [2]. Twele và cộng sự [3] kết hợp phân ngưỡng với phân loại vùng; Chini và cộng sự [4] chia nhỏ ảnh phân cấp nhằm thích ứng với phân bố không đồng nhất; Landuyt và cộng sự [5] chỉ ra phân ngưỡng đơn giản vẫn phổ biến nhất, trong đó thuật toán Otsu [6] được dùng nhiều vì tự xác định điểm chia.

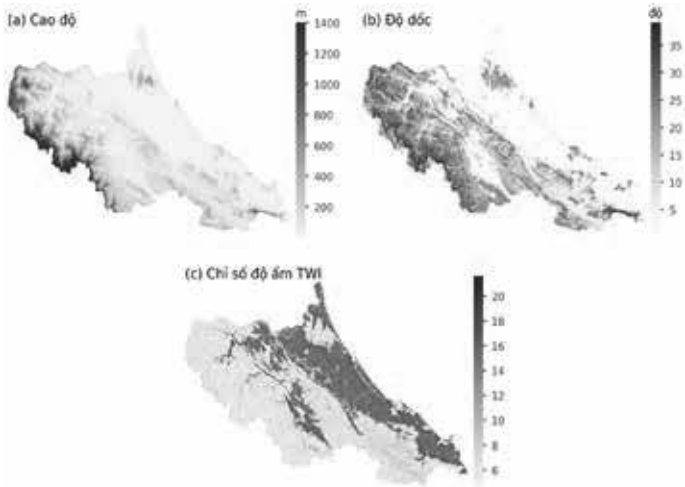
Tại Việt Nam, hướng này đã triển khai ở nhiều lưu vực: Dhara và cộng sự [7] tại Cần Thơ, Nguyễn Việt Hưng và cộng sự [8] tại TP.HCM, Trần Thanh Tùng và Trần Đăng Hùng [9] tại sông La Tinh, Trần Vũ Văn Hòa [10] tại Tứ giác Long Xuyên. Riêng với Hà Tĩnh, Nguyen [11] mô hình hóa hiểm họa ngập lụt bằng học máy kết hợp GIS, Pham và cộng sự [12] so sánh học sâu với các thuật toán chuẩn mực, còn Ha và cộng sự [13] áp dụng học máy và viễn thám tại Thừa Thiên Huế.

Điểm chung của các nghiên cứu trên là bộ kiểm kê ngập lụt được coi như đầu vào đã cho, ít khi kiểm chứng ngược với danh mục lũ thực tế. Ngưỡng tách nước thường lấy theo giá trị kinh nghiệm nước ngoài, trong khi giá trị này phụ thuộc phân cực, góc tới, lớp phủ và cách tiền xử lý nên không nhất thiết chuyển giao được; sai số vì vậy truyền thẳng vào mô hình mà không được nhận diện. Ở hướng khác, độ bất định của bản đồ ngập lập từ ảnh SAR đã được lượng hóa bằng cách tiếp cận xác suất thay cho nhãn nhị phân [14]; các tổng quan chuyên sâu chỉ ra sai số của phép phân ngưỡng phụ thuộc đồng thời vào cấu hình thu nhận, lớp phủ và thời điểm chụp so với diễn biến lũ [15]; còn khoảng cách giữa chu kỳ lặp của vệ tinh và thời gian tồn tại của vùng ngập được xem là hạn chế bậc nhất khi dùng ảnh viễn thám để ràng buộc mô hình thủy lực [16]. Nghiên cứu đặt 3 câu hỏi: ngưỡng nào phù hợp và phương pháp xác định ngưỡng tự động có đáng tin ở quy mô cấp tỉnh; bộ kiểm kê có nhất quán với quy luật địa hình và khí hậu; và phát hiện được bao nhiêu phần trong số các đợt lũ đã ghi nhận độc lập.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khu vực nghiên cứu là toàn tỉnh Hà Tĩnh theo địa giới hành chính 2 cấp có hiệu lực từ ngày 01/7/2025, gồm 69 đơn vị cấp xã với tổng diện tích 5.968,6 km^2, lệch 0,4% so với số công bố 5.994,4 km^2. Địa hình biến đổi từ cao độ âm ở cửa sông tới đỉnh Rào Cỏ 2.282 m, cao độ trung bình 171,4 m, độ dốc trung bình 11,1 độ (Hình 1).

Dữ liệu radar gồm 109 ảnh khảm Sentinel-1 kết xuất từ Google Earth Engine theo cặp trước và sau đỉnh lũ của 37 đợt trong giai đoạn 2015 - 2023, trong đó 35 đợt có đủ 2 thời điểm. Ảnh ở hệ VN-2000 múi 48 Bắc, 10 m, kích thước 14.844 × 9.945 điểm ảnh, 1 băng phân cực, đơn vị decibel; mỗi ảnh có 59.675.258 ô hợp lệ tương đương 5.968 km^2, trùng khớp diện tích đất liền của tỉnh. Dữ liệu phụ trợ gồm mô hình số độ cao Copernicus GLO-30 để tính độ dốc và loại bóng radar, cùng lớp phủ ESA WorldCover 2020 [17] xác định 196,9 km^2 mặt nước thường xuyên làm chuẩn hiệu chuẩn. Chỉ số độ ẩm địa hình tính theo Beven và Kirkby [18]. Xử lý bằng rasterio và WhiteboxTools trên Python 3.11.



Hình 1. Đặc trưng địa hình Hà Tĩnh: *(a) cao độ, (b) độ dốc, (c) chỉ số độ ẩm TWI*

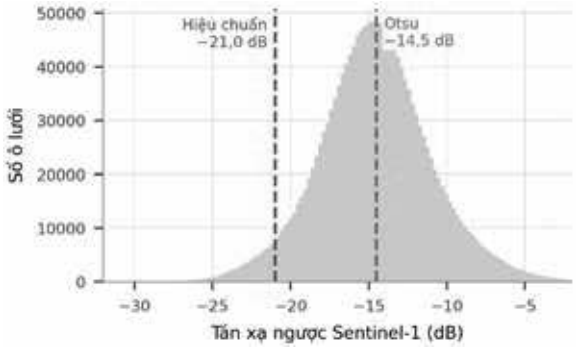
Quy ước kết xuất trên Google Earth Engine cần được nêu rõ vì liên quan trực tiếp đến hiện tượng trùng ảnh trình bày ở mục 3. Mỗi đợt được định danh bằng một ngày đỉnh lũ; tập ảnh Sentinel-1 GRD chế độ IW được lọc theo vùng phủ ranh giới tỉnh, rồi lọc tiếp theo 2 cửa sổ thời gian đặt hai bên ngày đỉnh, sau đó mỗi cửa sổ được ghép thành 1 ảnh khảm duy nhất mang nhãn BEFORE hoặc AFTER. Tên tệp kết xuất chỉ giữ ngày đỉnh lũ theo dạng S1_<năm>_peak_<ngày>_<mã>_<pha>_MOSAIC.tif, không mang theo thời điểm thu nhận của từng cảnh thành phần. Hệ quả là khi 2 cửa sổ cùng bắt được một lượt bay, phép ghép khảm trả về 2 tệp giống hệt nhau mà không phát sinh cảnh báo nào, do siêu dữ liệu thời gian đã bị loại khỏi sản phẩm. Tình huống này xảy ra khi bề rộng cửa sổ lọc lớn hơn chu kỳ lặp thực tế của vệ tinh trên khu vực, hoặc khi trong cả 2 cửa sổ chỉ tồn tại đúng một lượt bay khả dụng. Vì bản kết xuất không lưu tham số lọc của từng đợt, nguyên nhân được truy ngược bằng chính nội dung ảnh: mỗi tệp được lấy mẫu thưa theo bước 40 điểm ảnh rồi băm MD5; 2 pha của cùng một đợt có mã băm trùng nhau được kết luận là cùng một ảnh.

Ngưỡng tách nước được hiệu chuẩn theo 3 hướng để đối chiếu chéo: thuật toán Otsu [6] trên biểu đồ tần suất toàn tỉnh; neo theo diện tích, chọn ngưỡng sao cho diện tích nước bằng đúng 196,9 km^2 của lớp tham chiếu; và tối ưu F1 bằng đối chiếu từng ô, quét từ -30 dB đến -10 dB bước 0,5 dB. Vùng ngập mỗi đợt phải thỏa đồng thời 3 điều kiện: tán xạ ngược ảnh sau thấp hơn ngưỡng nước; thấp hơn ảnh trước ít nhất 3 dB nhằm loại sông hồ sẵn có; và độ dốc không quá 5 độ nhằm loại bóng radar. Cụm nhỏ hơn 50 ô bị loại như nhiễu đốm; phần thoả điều kiện thứ nhất ở cả 2 thời điểm được ghi riêng là mặt nước thường xuyên. Bộ kiểm kê cộng dồn số lần ngập của từng ô, sau đó áp mặt nạ ranh giới tỉnh.

Kiểm chứng độc lập dùng danh mục lũ lớn tổng hợp từ hồ sơ quản lý thủy lợi và báo chí, gồm thời gian, nguyên nhân khí tượng, lượng mưa trạm và mực nước đỉnh lũ. 9 đợt trong giai đoạn có ảnh được đối chiếu. Đợt lũ được coi là có ảnh khi tồn tại cặp ảnh lệch không quá 12 ngày so với thời điểm giữa đợt, và coi là phát hiện khi diện tích ngập vượt 10 km^2. Với các đợt bỏ sót, hiệu tán xạ ngược được phân tích trên vùng cao độ dưới 10 m, đồng thời nội dung từng cặp ảnh được băm để phát hiện cặp trùng lặp.

3. KẾT QUẢ

Biểu đồ tần suất toàn tỉnh (Hình 2) chỉ có 1 đỉnh, trung vị -14,64 dB, phân vị 5 là -20,48 dB và phân vị 95 là -8,43 dB. Không tồn tại 2 cụm nước và đất liền tách bạch, do mặt nước chỉ chiếm 3,3% diện tích nên bị tín hiệu đất liền lấn át.



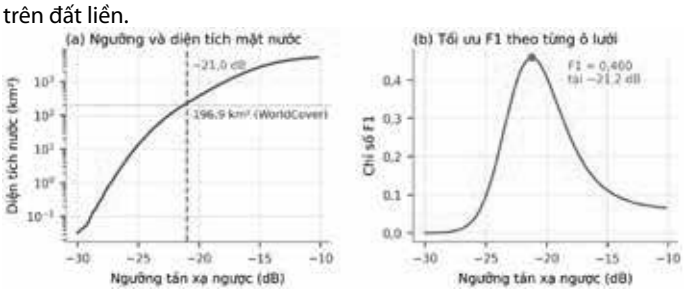
Hình 2. Biểu đồ tần suất tán xạ ngược Sentinel-1 toàn tỉnh

Hệ quả thể hiện ở Bảng 1. Otsu cho ngưỡng -14,52 dB, gần trùng trung vị, trong khi 2 hướng hiệu chuẩn theo dữ liệu tham chiếu cho kết quả gần như trùng nhau là -21,30 dB và -21,00 dB.

Bảng 1. Các phương pháp xác định ngưỡng tách nước

Phương pháp	Ngưỡng (dB)	Diện tích nước (km^2)	Tỷ lệ (%)	Sai lệch
Ngưỡng kinh nghiệm	-15,00	1.614,2	27,0	gấp 8,2 lần
Otsu tự động	-14,52	3.078,2	51,6	gấp 15,6 lần
Neo theo diện tích	-21,30	196,9	3,3	trùng khớp
Tối ưu chỉ số F1	-21,00	≈ 200	3,4	F1 = 0,460
Tham chiếu WorldCover	-	196,9	3,3	-

Quá trình quét ngưỡng ở Hình 3. Đường cong quan hệ ngưỡng và diện tích nước cắt vạch tham chiếu đúng tại -21,0 dB, còn F1 đạt cực đại 0,460 tại -21,2 dB. 2 hướng độc lập hội tụ cùng một giá trị củng cố độ tin cậy của ngưỡng, vốn nằm trong khoảng đặc trưng của phân cực VH chứ không phải -8 đến -10 dB thường thấy ở VV trên đất liền.



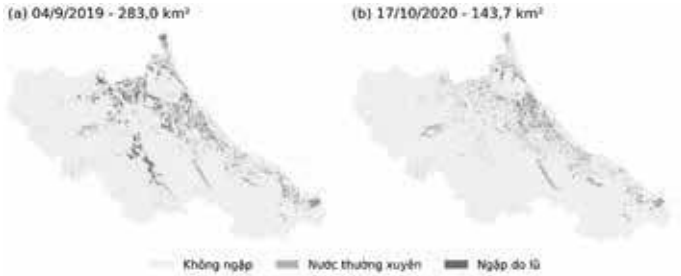
Hình 3. Hiệu chuẩn ngưỡng tách nước: *(a) ngưỡng và diện tích, (b) chỉ số F1*

Áp dụng ngưỡng cho 35 đợt, diện tích ngập dao động từ 0,0 đến 283,0 km^2; sáu đợt lớn nhất ở Bảng 2.

Bảng 2. Sáu đợt có diện tích ngập lớn nhất

Ảnh sau	Ngập (km^2)	Tỷ lệ (%)	Nước thường xuyên (km^2)
04/9/2019	283,0	4,74	209,7
18/7/2018	221,3	3,71	350,9
17/10/2020	143,7	2,41	270,7
09/12/2018	142,3	2,38	262,8
27/9/2023	80,0	1,34	219,3
16/7/2017	69,5	1,16	205,7

Hai đợt lớn nhất trùng với lũ ghi nhận ở Hình 4, hình thái vùng ngập bám theo hệ thống sông và dải đồng bằng ven biển phía đông.

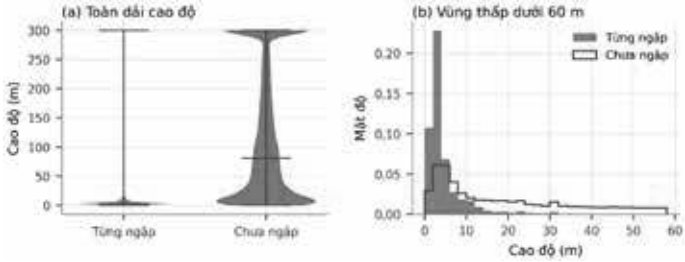


Hình 4. Vùng ngập từ ảnh Sentinel-1: *(a) 04/9/2019, (b) 17/10/2020*

Cộng dồn toàn bộ và áp mặt nạ ranh giới thu được bộ kiểm kê ở Hình 5. Diện tích từng ngập ít nhất 1 lần là 564,7 km^2, tức 9,46% diện tích tỉnh, trong đó 291,5 km^2 hay 4,88% ngập từ 2 lần trở lên; tần suất cao nhất là 9 lần.

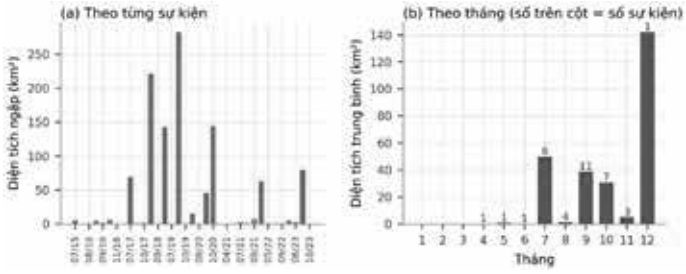
Hình 5. Bộ kiểm kê ngập lụt Hà Tĩnh, 2015 - 2023

Tính nhất quán với địa hình thể hiện ở Hình 6. Vùng từng ngập có cao độ trung bình 4,96 m và trung vị 3,13 m, so với 188,82 m và 81,22 m của vùng chưa ngập, chênh trung vị hơn 26 lần.



Hình 6. Cao độ vùng ngập và vùng không ngập: *(a) toàn dải, (b) dưới 60 m*

Phân bố theo đợt và theo tháng ở Hình 7. 9 đợt vượt 10 km^2 đều rơi vào tháng VII, IX, X và XII, diện tích trung bình tháng từ 30,8 km^2 đến 142,2 km^2, trong khi các tháng IV, V, VI và VIII gần như không ghi nhận. Phân bố này phù hợp chế độ mưa Bắc Trung Bộ, nơi mùa mưa kéo dài từ tháng VIII đến tháng XII và chiếm khoảng 63% lượng mưa năm.

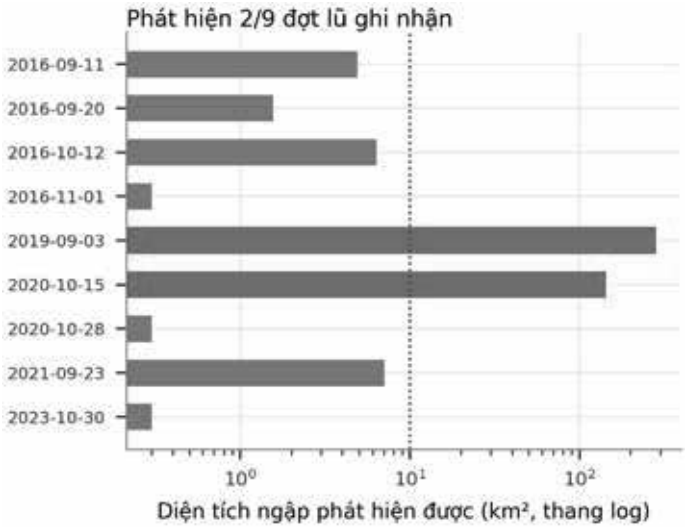


Hình 7. Diện tích ngập: *(a) theo từng đợt, (b) trung bình theo tháng*

Kết quả đối chiếu với 9 đợt lũ ghi nhận ở Bảng 3 và Hình 8. Chỉ 2 đợt được phát hiện là 03 - 05/9/2019 và trận lũ lịch sử 15 - 21/10/2020, đạt 22%; riêng 5 đợt lũ lớn và lịch sử thì phát hiện 2. 6 đợt bỏ sót dù có cặp ảnh lệch không quá 2 ngày, 1 đợt không có ảnh trong cửa sổ 12 ngày.

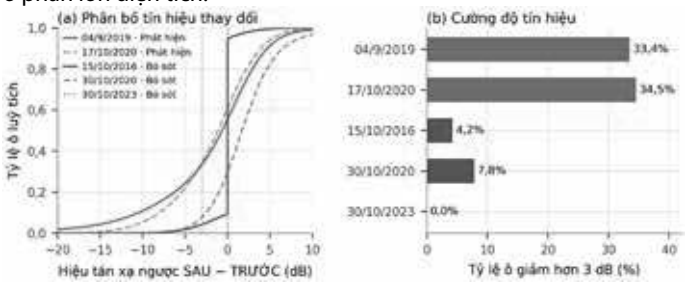
Bảng 3. Đối chiếu với 9 đợt lũ ghi nhận

Đợt lũ ghi nhận	Mức độ	Ảnh S1 (lệch)	Ngập (km^2)	Kết luận
11-14/9/2016	vừa	13/9/2016 (0)	4,9	bỏ sót
20-25/9/2016	vừa	22/9/2016 (0)	1,6	bỏ sót
12-16/10/2016	lớn	15/10/2016 (1)	6,3	bỏ sót
01-05/11/2016	vừa	01/11/2016 (2)	0,0	bỏ sót
03-05/9/2019	lớn	04/9/2019 (0)	283,0	phát hiện
15-21/10/2020	lịch sử	17/10/2020 (1)	143,7	phát hiện
28/10-01/11/2020	lớn	30/10/2020 (0)	0,1	bỏ sót
23-27/9/2021	vừa	08/9/2021 (17)	-	không có ảnh
30-31/10/2023	lớn	30/10/2023 (0)	0,0	bỏ sót



Hình 8. Đối chiếu với 9 đợt lũ ghi nhận độc lập

Phân tích nguyên nhân ở Hình 9. Trên vùng cao độ dưới 10 m, 2 đợt phát hiện được có 33,4% và 34,5% số ô với tán xạ ngược giảm quá 3 dB, phân vị 5 của hiệu lần lượt là -14,20 dB và -10,22 dB. 3 đợt bỏ sót chỉ đạt 4,2%, 7,8% và 0,0%, phân vị 5 là -2,51 dB, -3,80 dB và 0,00 dB. Riêng đợt 30/10/2023, hiệu tán xạ ngược bằng đúng 0,00 dB tại cả phân vị 5, phân vị 25 và trung vị, tức 2 ảnh không khác nhau ở phần lớn diện tích.



Hình 9. Chẩn đoán bỏ sót: *(a) phân bố tín hiệu, (b) cường độ tín hiệu*

Kết quả tính mã băm nội dung xác nhận nguyên nhân trực tiếp của hiện tượng bỏ sót. Có 4 trong 35 cặp ảnh có mã băm trùng nhau giữa ảnh trước và ảnh sau, tương ứng với các ngày 17/9/2015, 28/9/2018, 03/7/2019 và 16/10/2019; cả bốn trường hợp đều cho diện tích ngập 0,0 km^2. Tương quan giữa diện tích mặt nước thường xuyên và diện tích ngập chỉ đạt 0,023, cho thấy giả thuyết mặt nước thường xuyên trong ảnh nền không giải thích được hiện tượng bỏ sót.

4. THẢO LUẬN

Kết quả hiệu chuẩn cho thấy giá trị kinh nghiệm không chuyển giao được giữa các bối cảnh. Mức sai lệch gấp 8 lần ở ngưỡng -15 dB là hệ quả trực tiếp của việc áp dụng giá trị thiết lập cho phân cực VV vào dữ liệu VH, nơi tán xạ ngược trên đất liền thấp hơn 5 đến 8 dB. Nhận định này thống nhất với Landuyt và cộng sự [5] rằng phân ngưỡng đơn giản nhạy cảm với cấu hình thu nhận, và củng cố lập luận của Chini và cộng sự [4] về phân ngưỡng thích ứng theo dữ liệu thay vì hằng số cố định.

Việc Otsu thất bại ở quy mô cấp tỉnh có ý nghĩa thực hành. Giả thiết nền tảng của thuật toán [6] là biểu đồ 2 đỉnh ứng với 2 lớp cần tách. Khi mặt nước chỉ chiếm 3,3% diện tích, phân bố chỉ còn 1 đỉnh và điểm chia rơi vào giữa phân bố của riêng lớp đất liền, cho sai số lớn hơn cả ngưỡng kinh nghiệm. Điều này giải thích vì sao Chini và cộng sự [4] phải chia nhỏ ảnh phân cấp trước khi phân ngưỡng, và cho thấy các nghiên cứu áp dụng Otsu trên phạm vi hành chính rộng cần kiểm tra dạng phân bố trước khi tin vào kết quả.

Xét theo tiêu chí nội tại, bộ kiểm kê đáng tin cậy: chênh lệch cao độ trung vị hơn 26 lần và phân bố theo tháng trùng chế độ mưa lũ khu vực. Diện tích 564,7 km^2 cùng bậc độ lớn với kết quả của Nguyen [11] cho chính địa bàn này. Tuy nhiên phù hợp thống kê không đồng nghĩa với tính đầy đủ, và đó là điều khâu kiểm chứng độc lập bộc lộ.

Tỷ lệ phát hiện 2 trên 9 đợt là đáng lưu ý, đặc biệt khi phần lớn ca bỏ sót đều có ảnh cách thời điểm giữa đợt không quá 2 ngày. Phân tích hiệu tán xạ ngược cho thấy nguyên nhân nằm ở dữ liệu chứ không ở thuật toán: tín hiệu thay đổi không tồn tại. 4 cặp ảnh trùng khít là bằng chứng trực tiếp của lỗi ở khâu kết xuất, nhiều khả năng do cửa sổ thời gian lọc ảnh trước và sau bị chồng lấn, đúng với cơ chế kết xuất mô tả ở mục 2. Twele và cộng sự [3] tập trung tối ưu khâu phân loại mà chưa đề cập kiểm tra tính khác biệt của cặp ảnh đầu vào, trong khi kết quả ở đây cho thấy đó mới là yếu tố chi phối.

Một giới hạn cấu trúc khác cần tách bạch với lỗi kết xuất là quan hệ giữa chu kỳ lặp của Sentinel-1 và tốc độ rút nước. Chu kỳ lặp trên khu vực là 6 ngày trong giai đoạn 2 vệ tinh cùng hoạt động và trở lại 12 ngày sau khi Sentinel-1B ngừng hoạt động cuối năm 2021, trong khi lũ trên các sông ngắn và dốc của Hà Tĩnh thường rút trong 1 đến 3 ngày. Cửa sổ quan trắc vì vậy hẹp hơn nhiều so với nhịp chụp, nên ngay cả một quy trình xử lý hoàn hảo cũng chỉ lấy được một lát cắt ngẫu nhiên của đường quá trình lũ; đây đúng là hạn chế mà Grimaldi và cộng sự [16] nêu khi dùng ảnh viễn thám ràng buộc mô hình thủy lực, và là lý do Giustarini và cộng sự [14] đề xuất bản đồ ngập dạng xác suất thay cho nhãn nhị phân. Tuy vậy cơ chế này không giải thích được kết quả ở đây: cả 6 đợt bỏ sót đều có ảnh cách thời điểm giữa đợt không quá 2 ngày, tức nằm trong khoảng vùng ngập còn tồn tại, và Shen và cộng sự [15] cũng xếp chất lượng cặp ảnh đầu vào trước các yếu tố thuật toán. Lệch pha quan trắc do đó đặt ra trần cho tỷ lệ phát hiện về dài hạn và cần được công bố kèm mọi bộ kiểm kê, nhưng nguyên nhân chi phối trong nghiên cứu này vẫn là khiếm khuyết của dữ liệu đầu vào.

Hàm ý với mô hình hóa nguy cơ là đáng kể: vùng đánh dấu ngập gần như chắc chắn đúng, song phần lớn diện tích thực sự từng ngập lại không được ghi nhận. Khi tập nhãn thiên lệch được dùng huấn luyện, các chỉ số như diện tích dưới đường cong ROC vẫn có thể rất cao vì mô hình học tốt chính tập nhãn đó, nhưng năng lực dự báo thực bị hạn chế theo đúng mức thiên lệch. Điều này chưa được Pham và cộng sự [12] hay Ha và cộng sự [13] xem xét, do đều mặc định chất lượng bộ kiểm kê đầu vào. Nghiên cứu cũng có hạn chế: hiệu chuẩn dựa vào ảnh tổng hợp cả năm trong khi ảnh radar phản ánh 1 thời điểm, nên F1 đạt 0,460 phần nào phản ánh khác biệt bản chất dữ liệu; danh mục lũ đối chiếu có độ chi tiết không đồng đều; và phân ngưỡng đơn giản không phát hiện được ngập dưới tán cây hay ngập đô thị, nơi phản xạ 2 lần làm tán xạ ngược tăng thay vì giảm.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xử lý 109 ảnh Sentinel-1 thuộc 35 đợt đỉnh lũ tại Hà Tĩnh giai đoạn 2015 - 2023 và lượng hoá cả khả năng lẫn giới hạn của phương pháp so sánh ảnh trước - sau. Ngưỡng kinh nghiệm -15 dB cho diện tích mặt nước gấp 8 lần thực tế, còn Otsu sai lệch gấp gần 16 lần do biểu đồ tần suất cấp tỉnh chỉ có 1 đỉnh. 2 phương pháp hiệu chuẩn độc lập cùng hội tụ về -21 dB. Bộ kiểm kê xác định 564,7 km^2, tức 9,46% diện tích tỉnh, từng ngập ít nhất 1 lần, cao độ trung vị 3,13 m so với 81,22 m của phần còn lại.

Kiểm chứng với 9 đợt lũ ghi nhận cho thấy chỉ phát hiện được 2 đợt, và 2 trong 5 đợt lũ lớn. Nguyên nhân nằm ở dữ liệu: tỷ lệ ô vùng thấp có tán xạ ngược giảm quá 3 dB chỉ đạt 0,0 đến 7,8% ở các đợt bỏ sót so với 33,4 đến 34,5% ở các đợt phát hiện, và 4 trên 35 cặp ảnh trùng khít nội dung. Bộ kiểm kê vì vậy có độ chính xác cao nhưng độ bao phủ thấp.

Nghiên cứu khuyến nghị 3 nội dung: hiệu chuẩn ngưỡng theo dữ liệu tham chiếu của chính khu vực thay vì lấy giá trị kinh nghiệm, kèm kiểm tra dạng phân bố trước khi dùng thuật toán tự động; kiểm tra tính khác biệt của từng cặp ảnh bằng so sánh nội dung trước khi xử lý; và quan trọng nhất, đối chiếu mọi bộ kiểm kê với danh mục lũ đã ghi nhận, công bố kèm tỷ lệ phát hiện để người dùng đánh giá đúng mức thiên lệch của tập nhãn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu thuộc đề tài khoa học và công nghệ cấp tỉnh được phê duyệt 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] R. Torres et al. GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, vol. 120, pp. 9-24, 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.05.028.

[2] J.-F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick and A. S. Belward. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, vol. 540, no. 7633, pp. 418-422, 2016, doi: 10.1038/nature20584.

[3] A. Twele, W. Cao, S. Plank and S. Martinis. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. International Journal of Remote Sensing, vol. 37, no. 13, pp. 2990-3004, 2016, doi: 10.1080/01431161.2016.1192304.

[4] M. Chini, R. Hostache, L. Giustarini and P. Matgen. A hierarchical split-based approach for parametric thresholding of SAR images: flood inundation as a test case. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 12, pp. 6975-6988, 2017, doi: 10.1109/TGRS.2017.2737664.

[5] L. Landuyt, A. Van Wesemael, G. J.-P. Schumann, R. Hostache, N. E. C. Verhoest and F. M. B. Van Coillie. Flood mapping based on synthetic aperture radar: an assessment of established approaches. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, no. 2, pp. 722-739, 2019, doi: 10.1109/TGRS.2018.2860054.

[6] N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.

[7] S. Dhara, T. Dang, K. Parial and X. X. Lu. Accounting for uncertainty and reconstruction of flooding patterns based on multi-satellite imagery and support vector machine technique: a case study of Can Tho City, Vietnam. Water, vol. 12, no. 6, Art. no. 1543, 2020, doi: 10.3390/w12061543.

[8] Nguyễn Việt Hưng, Nguyễn Quốc Cường, Bùi Việt Hưng, Đặng Quang Thanh. Xây dựng bản đồ ngập lụt phục vụ công tác chống ngập, quy hoạch đô thị trên địa bàn TP Hồ Chí Minh. Tạp chí Khí tượng Thủy văn, số 725, tr. 29-39, 2021.

[9] Trần Thanh Tùng, Trần Đăng Hùng. Ứng dụng công cụ ước tính độ sâu ngập lũ (FwDET) để xây dựng bản đồ ngập lũ cho lưu vực sông La Tinh, tỉnh Bình Định. Tạp chí Khí tượng Thủy văn, số 752, tr. 62-74, 2023.

[10] Trần Vũ Văn Hòa. Ứng dụng công nghệ viễn thám xử lý ảnh Landsat và MODIS để đánh giá biến động lũ lụt tại vùng Tứ giác Long Xuyên. Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, TP Hồ Chí Minh, 2015.

[11] 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.

[12] B. T. Pham et al. 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.

[13] M. C. Ha et al. Machine learning and remote sensing application for extreme climate evaluation: example of flood susceptibility in the Hue Province, Central Vietnam region. Water, vol. 14, no. 10, Art. no. 1617, 2022, doi: 10.3390/w14101617.

[14] L. Giustarini et al. Probabilistic flood mapping using synthetic aperture radar data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, no. 12, pp. 6958-6969, 2016, doi: 10.1109/TGRS.2016.2592951.

[15] X. Shen, D. Wang, K. Mao, E. Anagnostou and Y. Hong. Inundation extent mapping by synthetic aperture radar: a review. Remote Sensing, vol. 11, no. 7, Art. no. 879, 2019, doi: 10.3390/rs11070879.

[16] S. Grimaldi, Y. Li, V. R. N. Pauwels and J. P. Walker. Remote sensing-derived water extent and level to constrain hydraulic flood forecasting models: opportunities and challenges. Surveys in Geophysics, vol. 37, pp. 977-1034, 2016, doi: 10.1007/s10712-016-9378-y.

[17] D. Zanaga et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. Zenodo, 2021, doi: 10.5281/zenodo.5571936.

[18] K. J. Beven and M. J. Kirkby. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, vol. 24, no. 1, pp. 43-69, 1979, doi: 10.1080/02626667909491834.

■ Ngày nộp bài: 10/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 21/8/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 08/9/2026

Tối ưu thể tích bê tông kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu bằng thuật toán tối ưu sao biển (SFOA)

Concrete volume optimization of the retaining wall behind the jetty using the starfish optimization algorithm (SFOA)

> THS.NCS ĐỖ QUANG THÀNH[1,*], TS VŨ HỮU TRƯỜNG[1], PGS.TS LÊ THANH CƯỜNG[2]
[1]Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Trường Đại học Mở TP Hồ Chí Minh
[*]Email: thanhdq.ctt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu áp dụng thuật toán tối ưu sao biển (Original Starfish Optimization Algorithm - SFOA) để tối thiểu hóa thể tích bê tông kết cấu tường chắn và bản đáy của một công trình thực tế phía sau cầu tàu, chịu đồng thời các nhóm ràng buộc kỹ thuật theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Mô hình phần tử hữu hạn SAP2000 được liên kết trực tiếp với MATLAB qua giao diện COM, cho phép SFOA cập nhật 6 biến chiều dày của các vùng kết cấu và đánh giá phản hồi kết cấu bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEM) trong từng bước lặp. Các nhóm ràng buộc gồm sức chịu tải cọc, chuyển vị ngang đỉnh tường, khả năng chịu cắt, bề rộng vết nứt và chọc thủng bản đáy theo từng cọc. Kết quả tối ưu với quần thể 50 cá thể, 50 vòng lặp cho thể tích bê tông 231,16 m^3, giảm thể tích bê tông 52,98 m^3 (18,65%) so với phương án kết cấu hiện hữu (284,14 m^3); đường cong hội tụ ổn định từ vòng lặp thứ 34 trở đi. Kết quả cho thấy phương pháp tối ưu có khả năng phân bổ lại chiều dày giữa các vùng kết cấu theo mức độ yêu cầu chịu lực, qua đó giảm thể tích bê tông so với phương án kết cấu hiện hữu.

Từ khóa: Thuật toán tối ưu sao biển; tối ưu thể tích bê tông; tường chắn phía sau cầu tàu; SAP2000-MATLAB; tối ưu kết cấu.

ABSTRACT

This study applies the Original Starfish Optimization Algorithm (SFOA) to minimize the concrete volume of the retaining wall and base slab of an actual structure behind a jetty, subject to simultaneous technical constraints under current design standards. The SAP2000 finite-element model is directly coupled with MATLAB through a COM interface, allowing SFOA to update six thickness variables of the structural zones and evaluate structural responses through finite-element analysis (FEM) at each iteration. The constraints include pile bearing capacity, lateral displacement at the wall top, shear capacity, crack width and punching shear of the base slab at individual piles. With a population of 50 individuals and 50 iterations, the optimization yields a concrete volume of 231.16 m^3, representing a reduction of 52.98 m^3 (18.65%) compared with the existing structural design (284.14 m^3); the convergence curve becomes stable from iteration 34 onward. The results demonstrate that the optimization method can redistribute the thicknesses among structural zones according to their load-bearing requirements, thereby reducing the concrete volume compared with the existing structural design.

Keywords: Starfish Optimization Algorithm; concrete volume optimization; retaining wall behind jetty; SAP2000-MATLAB; structural optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, trong nghiên cứu này là kết cấu chắn đất phía sau cầu tàu, bố trí tại khu vực tiếp giáp giữa công trình cầu tàu và bãi phía sau bến, có chức năng giữ ổn định khối đất đắp và bảo vệ mặt bãi sau bến. Kết cấu tường chắn gồm các bộ phận bản đáy, tường mặt và tường cánh, thường được chia thành các vùng có chiều dày khác nhau theo cao trình và vị trí nhằm phù hợp với sự phân bố nội lực thực tế. Do đó, thể tích bê tông của kết cấu phụ thuộc đồng thời vào nhiều biến thiết kế là chiều dày của các vùng kết cấu. Trong thiết kế theo phương pháp thông thường, tiết diện thường được lựa chọn sơ bộ dựa trên kinh nghiệm và yêu cầu cấu tạo, sau đó kiểm tra tuần tự từng tiết diện. Cách tiếp cận này khó xác định đồng thời tổ hợp chiều dày tối thiểu cho tất cả các vùng mà vẫn thỏa mãn các

ràng buộc kỹ thuật, có thể dẫn đến dư thừa khả năng chịu lực cục bộ và làm tăng thể tích bê tông sử dụng.

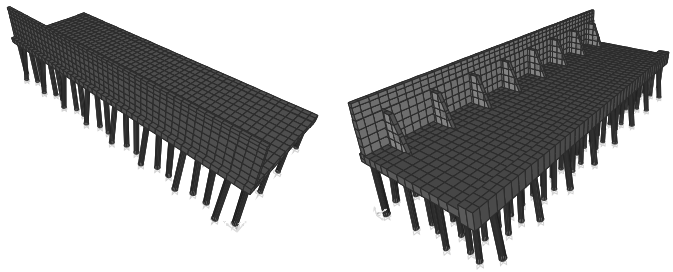
Các thuật toán tối ưu metaheuristic, kết hợp trực tiếp với mô hình phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá phản hồi kết cấu trong vòng lặp tối ưu, phù hợp với lớp bài toán tối ưu kết cấu có tính phi tuyến cao, biến thiết kế rời rạc và nhiều ràng buộc kỹ thuật đồng thời mà phương pháp tối ưu cổ điển khó xử lý [1]. Thuật toán tối ưu sao biển (SFOA) là thuật toán metaheuristic mới được đề xuất năm 2025, lấy cảm hứng từ hành vi săn mồi và tái sinh của sao biển, đã được đánh giá hiệu quả trên nhiều hàm kiểm thử chuẩn và một số bài toán kỹ thuật [1]. Nghiên cứu này không đánh giá SFOA trên các hàm kiểm thử chuẩn mà tập trung vào khả năng ứng dụng SFOA cho bài toán tối ưu kết cấu thực tế, kết hợp trực tiếp với FEM và các ràng buộc theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành.

Việc kết hợp SFOA với SAP2000 cho bài toán tối ưu thể tích bê tông kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, chịu đồng thời các nhóm ràng buộc kỹ thuật theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, chưa được xem xét trong phạm vi khảo sát của nghiên cứu này. Mục tiêu của nghiên cứu là: (1) Xây dựng khung tính toán SAP2000-MATLAB-SFOA cho bài toán tối ưu thể tích bê tông của 6 vùng chiều dày tường chắn phía sau cầu tàu, chịu đồng thời 5 nhóm ràng buộc kỹ thuật theo hệ tiêu chuẩn được lựa chọn; (2) Áp dụng khung tính toán này cho một công trình thực tế và đánh giá mức giảm thể tích bê tông so với hiện trạng. Đóng góp chính của nghiên cứu là minh chứng qua một công trình thực tế về khả năng ứng dụng SFOA gốc, không cần điều chỉnh hay lai ghép thêm cơ chế nào, cho một bài toán tối ưu kết cấu chắn đất thực tế có nhiều nhóm ràng buộc kỹ thuật đồng thời. Với 6 biến thiết kế được rời rạc hóa theo bước 0,01 m, không gian thiết kế chứa số lượng lớn các phương án có thể lựa chọn, khiến việc khảo sát toàn bộ đòi hỏi chi phí tính toán cao. Do đó, nghiên cứu sử dụng SFOA để tìm kiếm nghiệm tối ưu là cần thiết.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Hệ kết cấu

Hệ kết cấu được sử dụng làm đối tượng nghiên cứu, như mô tả ở Mục 1, là tường chắn cao 4,5 m, gồm tường mặt với 3 vùng có chiều dày khác nhau theo cao trình và vị trí dọc tuyến; tường cánh có một chiều dày không đổi dọc tuyến và liên kết với bản đáy đặt trên hệ 142 cọc bê tông ly tâm ứng suất trước (D400 và D500); bản đáy được chia thành hai vùng chiều dày độc lập. Tường chắn và bản đáy được mô hình hóa bằng phần tử vỏ (shell) trong SAP2000, sử dụng bê tông mác M350; hệ cọc được mô hình hóa bằng phần tử thanh (frame), với kích thước và bố trí được giữ nguyên trong suốt quá trình tối ưu.



Hình 1. Mô hình phần tử hữu hạn 3D của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu

2.2. Tải trọng và tổ hợp tải

Hệ kết cấu chịu các trường hợp tải trọng gồm tĩnh tải bản thân (DEAD), tải đất đắp sau tường (Gdat), tải tập trung do áp lực đất (Pdat), tải phân bố do áp lực đất (ALD) và hoạt tải trên mặt bãi (HH). Tĩnh tải bản thân được SAP2000 tự động xác định từ trọng lượng bản thân của kết cấu; các tải còn lại được nhập trực tiếp vào mô hình với các giá trị như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị tải trọng tính toán dùng trong mô hình

Trường hợp	Đơn vị	Giá trị	Dạng tải trọng
Gdat	T/m²	7,02	Tải phân bố
HH	T/m²	2,00	Tải phân bố
Pdat	T	2,867	Lực tập trung tại nút
ALD	T/m²	2,104; 0,935	Tải phân bố theo vùng

Các tổ hợp tải trọng được xét:

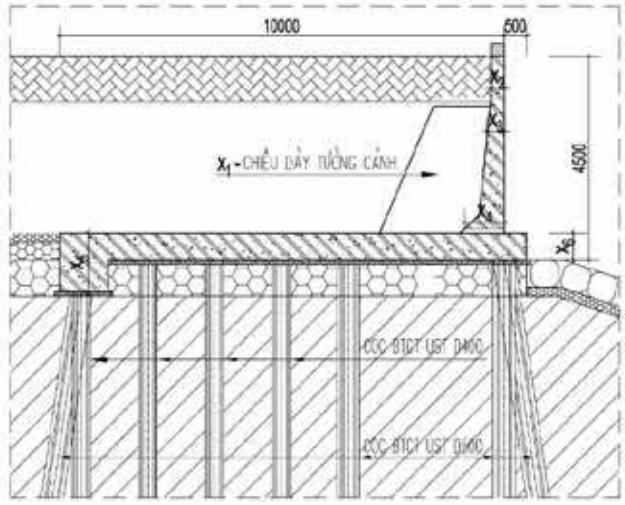
TH1 = DEAD + Gdat + Pdat + ALD

TH2 = TH1 + HH

BAO=ENVELOPE (TH1; TH2)

2.3. Biến thiết kế và hàm mục tiêu

Biến thiết kế $x = [x_1, x_2, ..., x_6]$ lần lượt là chiều dày của tường cánh, ba vùng tường mặt và hai vùng bản đáy. Các biến được rời rạc hóa theo bước 0,01 m trước khi cập nhật vào mô hình SAP2000. Miền giá trị khảo sát được xác định theo các yêu cầu về cấu tạo và thi công gồm: $x_1, x_2 \in [0,15; 0,40]$; $x_3 \in [0,15; 0,50]$; $x_4 \in [0,20; 0,90]$; $x_5 \in [0,45; 1,40]$; $x_6 \in [0,30; 0,70]$.



Hình 2. Các biến thiết kế của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu

Hàm mục tiêu là tổng thể tích bê tông các vùng kết cấu, được xác định trực tiếp từ diện tích tương ứng và chiều dày thiết kế:

$$V(x) = \sum_{i=1}^{6} A_i \cdot x_i \quad (1)$$

Với A_i là diện tích vùng i (m²), x_i là chiều dày vùng i (m) và V(x) là thể tích bê tông (m³).

Hàm thích nghi dùng cho SFOA kết hợp hàm mục tiêu với hàm phạt tuyến tính theo tổng mức vi phạm ràng buộc g(x) [2]:

$$f(x) = V(x) + C \cdot g(x) \quad (2)$$

$$g(x) = \sum_{j=1}^{5} \max\left(0, v_j(x)\right) \quad (3)$$

Với $v_j(x)$ là mức vi phạm không thứ nguyên của nhóm ràng buộc thứ j, xác định theo tỷ số giữa đại lượng kiểm tra $R_j(x)$ và giới hạn cho phép $R_{j,lim}$:

$$v_j(x) = \max\left(0, \frac{R_j(x)}{R_{j,\text{lim}}} - 1\right) \quad (4)$$

($v_j(x) = 0$ nếu ràng buộc được thỏa mãn).

Trong nghiên cứu này, hệ số phạt được chọn bằng $C = 10^6$ nhằm ưu tiên các nghiệm thỏa mãn ràng buộc.

2.4. Ràng buộc kỹ thuật

Các nhóm ràng buộc kỹ thuật được kiểm tra tại mỗi lần đánh giá, áp dụng cùng nguồn tiêu chuẩn và cách xử lý trong vòng lặp tối ưu được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Nhóm ràng buộc kỹ thuật của bài toán tối ưu

STT	Ràng buộc	Đại lượng kiểm tra	Điều kiện thỏa mãn	Ghi chú
1	Sức chịu tải cọc	N_d xác định từ phản lực đầu cọc	$N_d \le [N_d]$ (D400: 78,76T; D500: 112,44T)	TCVN 10304:2025
2	Chuyển vị ngang đỉnh tường	max|U_1| tại các nút thuộc nhóm đỉnh tường	≤ min(H/300, 100 mm)	TCVN 11820-5:2021
3	Khả năng chịu cắt	Lực cắt Q tại tiết diện cách mặt gối tựa một đoạn h_0	$\gamma_{lc}\cdot\gamma_n\cdot Q \le \gamma_c\cdot\gamma_{b7}\cdot Q_b$	TCVN 4116:2023
4	Bề rộng vết nứt	a_{cr} tính từ ứng suất cốt thép σ_s	$a_{cr} \le \gamma_c \cdot 0{,}2$mm	TCVN 4116:2023
5	Chọc thủng bản đáy	Phản lực đầu cọc so với khả năng chống chọc thủng theo chu vi tháp chọc thủng	$\|N_d\| \le \gamma_c\cdot R_{bt}\cdot u\cdot h_0$	TCVN 5574:2018

Theo [4], Bảng 12, giới hạn chuyển vị ngang cho nhóm ràng buộc 2 là 15 mm. Nhóm ràng buộc 3 và 4 được kiểm tra riêng cho từng vùng, sử dụng nội lực bao (M, V) trích xuất từ SAP2000 theo tổ hợp bao; đối với kiểm tra chịu cắt, nội lực được trích xuất tại các vị trí cách mặt gối tựa hoặc mép cọc một khoảng không nhỏ hơn h_0, nhằm hạn chế đỉnh nội lực cục bộ tại biên phần tử vỏ. Nhóm ràng buộc 5 về kiểm tra chọc thủng được thực hiện riêng cho từng cọc, với h_0 của vùng bản đáy tương ứng.

2.5. Khung tính toán SAP2000-MATLAB-SFOA

Quá trình đánh giá mỗi cá thể được thực hiện tuần tự. Trước hết, các biến thiết kế được rời rạc hóa theo bước 0,01 m và cập nhật vào mô hình SAP2000 thông qua hàm OAPI SetShell_1. Sau đó, mô hình được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định phản lực đầu cọc, chuyển vị và nội lực vỏ theo tổ hợp bao. Các kết quả này được sử dụng để kiểm tra các nhóm ràng buộc, tính thể tích bê tông và hàm thích nghi, sau đó trả về SFOA để cập nhật quần thể.

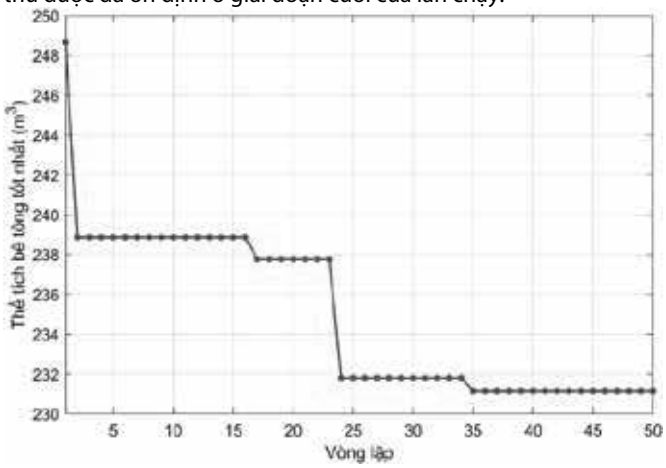
2.6. Thuật toán SFOA và thiết lập tính toán

Thuật toán SFOA [1], gồm hai giai đoạn khám phá và khai thác dựa trên hành vi tìm mồi và tái sinh của sao biển, không bổ sung cơ chế nào khác. Do mục tiêu nghiên cứu là đánh giá khả năng ứng dụng SFOA cho một bài toán thiết kế cụ thể, không nhằm so sánh hay phát triển thuật toán, quá trình tối ưu chỉ thực hiện một lần chạy duy nhất (Nrun = 1), không yêu cầu thống kê giá trị tốt nhất, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn qua nhiều lần chạy như các nghiên cứu đánh giá thuật toán. Khảo sát sơ bộ với N_{pop}=15, 40 vòng lặp cho thấy nghiệm cải thiện rất ít ở các vòng lặp cuối, do đó nghiên cứu chọn N_{pop}=50, Maxit=50 (2.550 lần đánh giá) cho lần chạy chính thức, lớn hơn đáng kể ngưỡng hội tụ quan sát được để tạo biên an toàn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự hội tụ của thuật toán

Hình 3 thể hiện đường cong hội tụ (giá trị tốt nhất tích lũy theo vòng lặp) của lần chạy chính thức. Giá trị hàm mục tiêu giảm theo từng nấc trong quá trình tối ưu, từ 248,67 m^3 ở vòng lặp thứ nhất xuống 238,87 m^3 ở vòng lặp thứ 2, tiếp tục giảm xuống 237,77 m^3 ở vòng lặp 17 và 231,81 m^3 ở vòng lặp 24, sau đó không đổi từ vòng lặp 34 đến 50 (231,16 m^3 trong 17 vòng lặp cuối), cho thấy nghiệm thu được đã ổn định ở giai đoạn cuối của lần chạy.



Hình 3. Đường cong hội tụ của SFOA

3.2. Nghiệm tối ưu

Bảng 3. So sánh nghiệm tối ưu với phương án kết cấu hiện hữu

Biến thiết kế	Chiều dày hiện trạng (m)	Chiều dày tối ưu (m)
x_1	0,30	0,15
x_2	0,30	0,23
x_3	0,43	0,25
x_4	0,78	0,27
x_5	1,30	0,69
x_6	0,60	0,59
Thể tích bê tông V (m^3)	284,14	231,16 (nhỏ nhất)
Chênh lệch ΔV		-52,98 m^3 (-18,65%)

Nghiệm tối ưu giảm chiều dày ở cả 6 vùng so với hiện trạng, với mức giảm lớn nhất thuộc về vùng chân tường chắn (biến x_4 giảm 65,4%, từ 0,78 m xuống 0,27 m) và nhỏ nhất thuộc về vùng bản đáy (biến x_6 giảm 1,7%, từ 0,60 m xuống 0,59 m). Kết quả cho thấy mức giảm chiều dày giữa các vùng là khác nhau, phản ánh sự khác biệt về hình học và yêu cầu chịu lực của từng vùng trong quá trình tối ưu.

3.3. Kiểm tra ràng buộc kỹ thuật của nghiệm tối ưu

Bảng 4. Kiểm tra ràng buộc của nghiệm tối ưu

Ràng buộc	Giá trị/tỷ số	Giới hạn	Kết quả
Sức chịu tải cọc (tỷ số $N_d/[N_d]$)	0,372	≤ 1,0	Đạt
Chuyển vị ngang đỉnh tường	4,15 mm	≤ 15 mm	Đạt
Khả năng chịu cắt	Không vi phạm	--	Đạt
Bề rộng vết nứt	Không vi phạm	≤ 0,2 mm	Đạt
Chọc thủng bản đáy	0,41	≤ 1,0	Đạt

Toàn bộ năm nhóm ràng buộc kỹ thuật đều được thỏa mãn. Đối với sức chịu tải cọc, tỷ số sử dụng lớn nhất là 37,2%; chuyển vị ngang đỉnh tường đạt 27,7% giới hạn (4,15 mm so với 15 mm); chọc thủng đạt tối đa 41,0%. Các điều kiện chịu cắt và bề rộng vết nứt vẫn cần được kiểm soát khi tiếp tục giảm chiều dày các vùng kết cấu.

3.4. Hiệu quả tính toán

Thời gian tính toán trung bình khoảng 14,2 giây cho mỗi lần đánh giá trong tổng số 2.550 lần đánh giá, tương ứng tổng thời gian khoảng 10 giờ 2 phút cho toàn bộ quá trình tối ưu.

3.5. Hạn chế

Nghiên cứu chỉ thực hiện một lần chạy tối ưu (Nrun = 1), phù hợp với mục tiêu đánh giá khả năng ứng dụng SFOA cho một công trình cụ thể thay vì đánh giá độ ổn định thống kê của thuật toán. Đường cong hội tụ ở Mục 3.1 được sử dụng để đánh giá sự ổn định của nghiệm trong quá trình tối ưu. Trong vòng lặp tối ưu, các ràng buộc về chịu cắt và bề rộng vết nứt được kiểm tra trên cơ sở tỷ lệ cốt thép dự kiến từ mô men yêu cầu, chưa xét đến cấu tạo cốt thép cụ thể trong bản vẽ thiết kế. Đối với chọc thủng, nghiệm tối ưu được kiểm tra bổ sung độc lập với vòng lặp theo EN 1992-1-1 [7], cho toàn bộ 142 cọc, phân loại theo vị trí trong, biên và góc bản đáy, sử dụng các hệ số β lần lượt là 1,15; 1,40 và 1,50. Kết quả cho thấy không có cọc nào vi phạm, tỷ số sử dụng lớn nhất bằng 0,41 tại một cọc biên; biến chiều dày x_1 hội tụ đúng tại cận dưới của phạm vi khảo sát trong bài toán tối ưu. Do đó, nghiệm thu được xem là phương án đề xuất ở cấp độ tối ưu chiều dày; trước khi áp dụng cho thiết kế thi công, cần tiếp tục hoàn thiện và kiểm tra chi tiết cốt thép theo hồ sơ thiết kế.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và áp dụng khung tính toán kết hợp SAP2000-MATLAB và thuật toán SFOA để tối ưu 6 biến chiều dày của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, đồng thời kiểm tra 5 nhóm ràng buộc kỹ thuật theo các tiêu chuẩn phù hợp với công trình bến cảng biển.

Đối với công trình khảo sát, nghiệm tối ưu cho thể tích bê tông 231,16 m^3, giảm 52,98 m^3, tương đương 18,65% so với phương án kết cấu hiện hữu. Nghiệm thu được thỏa mãn toàn bộ các ràng buộc kiểm tra và ổn định ở các vòng lặp cuối của quá trình tối ưu.

Kết quả hiện mới dừng ở tối ưu chiều dày và kiểm tra ràng buộc trong mô hình tính toán; hậu kiểm bổ sung cho thấy nghiệm tối ưu cũng thỏa mãn điều kiện chọc thủng theo EN 1992-1-1 với tỷ số sử dụng lớn nhất 0,41. Việc hoàn thiện chi tiết cốt thép cần được thực hiện ở bước thiết kế tiếp theo trước khi áp dụng cho thiết kế thi công.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo phát triển SFOA theo hướng MOSFOA nhằm xem xét bài toán tối ưu đa mục tiêu đối với các kết cấu tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Zhong, C., Li, G., Meng, Z., Li, H., Yildiz, A.R., Mirjalili, S. Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers. Neural Computing and Applications, vol. 37, pp. 3641-3683, 2025, doi: 10.1007/s00521-024-10694-1.

[2] Deb, K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 186, no. 2-4, pp. 311-338, 2000, doi: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8.

[3] TCVN 10304:2025. Thiết kế móng cọc. Bộ Xây dựng, Việt Nam, 2025.

[4] TCVN 11820-5:2021. Công trình cảng biển - Yêu cầu thiết kế - Phần 5: Công trình bến. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2021.

[5] TCVN 4116:2023. Công trình thủy lợi - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép thủy công - Yêu cầu thiết kế. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2023.

[6] TCVN 5574:2018. Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2018.

[7] EN 1992-1-1:2004+A1:2014. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2014.

■Ngày nhận bài: 04/9/2026 ■Ngày sửa bài: 10/9/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2026

Nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu đến khả năng chịu cắt của sàn phẳng bê tông cốt thép

A study on the effects of material properties on the shear capacity of reinforced concrete slabs

> ĐÀO CÔNG BÌNH[1], NGUYỄN PHÙNG TÀI LONG[2,*], NGUYỄN THANH HÀ[3], DƯƠNG THANH QUỲNH[3], NGUYỄN MẠNH CƯỜNG[3]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Tổng cục Hậu cần - Kỹ thuật

[3] Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

[*]Email: longtailongtai@gmail.com

TÓM TẮT

Khi tính toán thiết kế sàn phẳng không dầm bê tông cốt thép (BTCT), do chiều dày kết cấu sàn cần hạn chế để giảm tải trọng và tăng khả năng vượt nhịp nên một trong những vấn đề thiết kế cần quan tâm là làm thế nào để tăng khả năng chống chịu lại lực cắt do tải trọng ngoài gây ra để đảm bảo sàn không bị phá hoại do lực cắt đặc biệt là tại các vị trí bản sàn được kê trực tiếp lên đầu cột.

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phần mềm ABAQUS để xây dựng mô hình mô phỏng và phân tích khả năng chịu cắt của sàn bê tông cốt thép chịu tải trọng tập trung cũng như so sánh khả năng chịu cắt của sàn khi tính theo TCVN 5574:2018 và một số tiêu chuẩn Quốc tế làm cơ sở đề xuất giải pháp tăng khả năng chịu cắt cho sàn phẳng không dầm BTCT trong thực tế.

Từ khóa: Sàn phẳng không dầm; chịu cắt; chọc thủng.

ABSTRACT

In the design of reinforced concrete flat slabs, the slab thickness is generally limited to reduce self-weight and enhance span capacity. Consequently, improving shear capacity, particularly punching shear resistance at slab-column connections where the slab is directly supported by columns, is a critical design consideration.

In this study, a numerical model is developed using ABAQUS to investigate the punching shear capacity of reinforced concrete flat slabs subjected to concentrated loading. The numerical results are compared with the shear capacities predicted by TCVN 5574:2018 and selected international design standards. Based on these comparisons, practical measures are proposed to enhance the punching shear capacity of reinforced concrete flat slabs.

Keywords: Flat slab; shear capacity; punching shear.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu sàn phẳng BTCT là loại kết cấu sàn thường được lựa chọn sử dụng trong các công trình nhà nhiều tầng như văn phòng, chung cư, khách sạn,… do đáp ứng được các yêu cầu về giải pháp kiến trúc, giảm chiều cao tầng, tăng số lượng sàn sử dụng, thuận tiện trong thi công đạt hiệu quả kinh tế cao. Để đạt được hiệu quả cao trong tính toán thiết kế kết cấu công trình sử dụng sàn phẳng, giải pháp yêu cầu thương là phải giảm tối đa chiều dày sàn để giảm trọng lượng công trình. Do đó khi tính toán kết cấu sàn BTCT, một trong những nội dung thường được quan tâm đó là tính toán khả năng chịu cắt của sàn, đảm bảo sàn không bị cắt thủng dưới tác dụng của tải trọng đặc biệt quan tâm tại vị trí bản sàn được kê trực tiếp lên đầu cột.

Trong tính toán kiểm tra khả năng chịu cắt của sàn, có thể thấy rằng tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 [3] và tiêu chuẩn ACI 318-2014 [9] chưa kể đến sự tham gia chịu lực của cốt thép (hàm lượng cốt thép dọc). Trong khi đó, tiêu chuẩn EC2-2004 [12] đã có xét đến vấn đề này.

Để có cơ sở đề xuất áp dụng tiêu chuẩn thiết kế nào trong tính toán cũng như đề xuất giải pháp tăng cường khả năng chịu cắt của sàn phẳng bê tông cốt thép, nhóm tác giả sử dụng phần mềm ABAQUS để xây dựng mô hình mô phỏng và nghiên cứu, phân tích khả năng chịu cắt của sàn phẳng BTCT chịu tải trọng tập trung, trong đó tập trung so sánh kết quả tính toán khả năng chịu cắt của sàn phẳng bê tông cốt thép với TCVN 5574-2018 và tiêu chuẩn ACI 318-2014, EC2-2004.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH KHẢO SÁT, TÍNH TOÁN

2.1. Xác minh độ tin cậy của mô hình mô phỏng

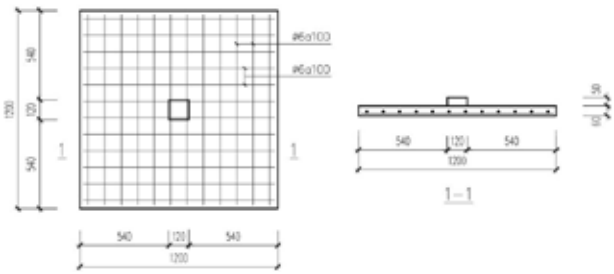
2.1.1. Lựa chọn thí nghiệm để kiểm chứng

Thí nghiệm được lựa chọn so sánh dựa trên nghiên cứu về khả năng chống cắt của sàn BTCT do A.K.M. Jahangir Alam thực hiện năm 1997 [4].

Trong thí nghiệm này A.K.M. Jahangir Alam khảo sát ảnh hưởng của bề rộng của dầm bo xung quanh và hàm lượng cốt thép tới khả năng chống cắt của sàn phẳng BTCT.

2.1.2. Thiết lập mô hình số

Mô hình nghiên cứu có kích thước hình học và cấu tạo cốt thép được trình bày trên Hình 1. Trong mô phỏng thí nghiệm của nhóm tác giả tương đương với trường hợp bề rộng dầm bằng 0 trong thí nghiệm của tác giả A.K.M. Jahangir Alam.



Hình 1. Chi tiết về thí nghiệm chống cắt của sàn BTCT [4]

a. Mô hình vật liệu

Trong nghiên cứu này, mô hình độ dẻo hư hỏng của bê tông (CDP model) được lựa chọn để mô phỏng sàn và cột bê tông

b. Mô hình phần tử

Kiểu phần tử dạng khối (solid) C3D8R với 8 điểm nút được lựa chọn để mô hình hóa cho bê tông. Theo ABAQUS thì kiểu phần tử này có thể sử dụng trong phân tích phi tuyến bao gồm tương tác giữa bê tông và cốt thép, biến dạng lớn, biến dạng chảy dẻo và phá hủy.

c. Liên kết giữa các phần tử trong mô phỏng

Trong mô hình mô phỏng, phần tử cốt thép T3D2 được nhúng trong bê tông bằng liên kết embedded. Cột và bản sàn bê tông được liên kết với nhau thông qua liên kết ngàm cứng (Tie interaction).

Kiểu phần tử dạng trục (truss) T3D2 với 2 điểm nút được sử dụng để mô tả các thanh thép gia cường D6. Phần tử T3D2 chỉ chịu lực tác dụng theo phương dọc trục.

d. Mô hình tải trọng và điều kiện biên

Tải trọng tác dụng được gán dưới dạng áp lực thông qua bề mặt phần cột nhô lên có kích thước (120 x 120) mm. Giá trị tải trọng này tăng theo thời gian. Tải trọng được gia tăng liên tục cho đến khi mô hình bị phá hoại.

Các liên kết được đặt vào vị trí cách mép bản sàn 2 cm, các nút này được ngăn cản chuyển vị theo phương đứng tương ứng với UY=0.

e. Chia lưới phần tử

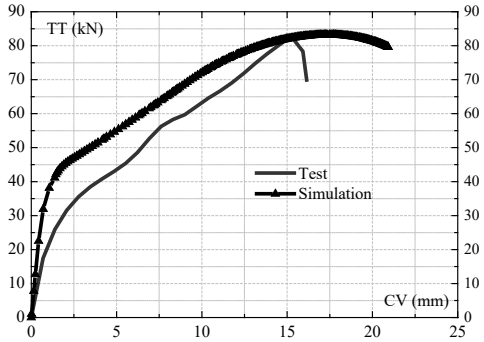
Lưới kích thước 2 cm cho các phần tử thống nhất trong cả mô hình đảm bảo độ chính xác của kết quả cũng như tiết kiệm thời gian tính toán.

2.1.3. Kết quả phân tích mô hình mô phỏng

Phân tích bài toán mô phỏng cho đến khi sàn bị phá hoại cắt ta thu được kết quả như sau:

a. Đường cong tải trọng - chuyển vị (TT-CV)

Mối quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị: là yếu tố quan trọng để đánh giá khả năng chịu lực và sự làm việc của kết cấu. Dưới đây là biểu đồ thể hiện mối quan hệ **tải trọng - chuyển vị** của điểm giữa phía dưới của tấm trong thí nghiệm:



Hình 2. Đường cong tải trọng - chuyển vị theo thí nghiệm (Test) và mô phỏng (Simulation) tại điểm giữa sàn

Từ biểu đồ này ta thấy tại thời điểm tải trọng khoảng từ 0 đến P_1=19,5 kN mối quan hệ giữa tải trọng - chuyển vị là quan hệ tuyến tính. Trong thời điểm này kết cấu làm việc trong giai đoạn đàn hồi, bê tông chưa bị nứt. Khoảng tải trọng từ P_1=19,75 kN đến P_2=81,75 kN bê tông bị nứt và cốt thép bắt đầu tham gia làm việc, mối quan hệ tải trọng - chuyển vị không còn tuyến tính nữa. Khi tải trọng tác dụng lên sàn tiếp tục tăng đến giá trị 81,75 kN thì chuyển vị tại điểm giữa sàn tăng đột ngột, mẫu sàn bị phá hoại cắt.

Dựa vào biểu đồ mối quan hệ tải trọng - chuyển vị có thể thấy tại thời điểm lực tác dụng đạt giá trị 81,75 kN chuyển vị tại điểm giữa sàn đột ngột tăng. Thời điểm này cũng là lúc sàn bị phá hoại do lực cắt, từ đó ta xác định được khả năng chịu cắt bằng P_{ph}=81,75 kN.

Có thể nhận thấy kết quả đạt được từ mô phỏng về cơ bản cho thấy sự đồng nhất với thí nghiệm. Lực phá hoại trong mô hình mô phỏng là 82,8 kN tương ứng với chuyển vị là 17 mm trong khi kết quả đạt được từ thí nghiệm là 81,75 kN tương ứng với chuyển vị 15,2 mm.

Từ đường cong quan hệ tải trọng - chuyển vị thu được bằng mô phỏng số và bằng thực nghiệm cho thấy có sự khá tương đồng về hình dạng.

Lực phá hoại cắt: Ta có bảng so sánh giá trị lực phá hoại cắt giữa thí nghiệm của Alam và giá trị lực phá hoại cắt khi phân tích bằng phần mềm ABAQUS:

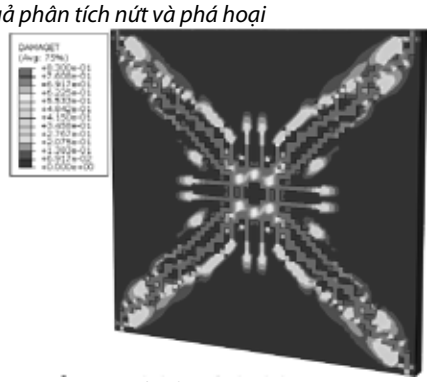
Bảng 1. So sánh giá trị lực cắt lớn nhất trong bài toán mô phỏng

Mô hình phân tích	Pph (kN)	ΔPph (%)
Alam (1)	81,75	**0**
ABAQUS (2)	82,80	**1,3**

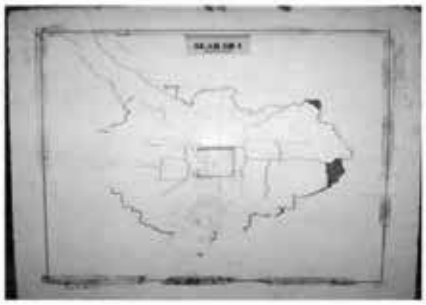
Xét về lực phá hoại cắt, giữa thí nghiệm của Alam và mô hình ABAQUS chênh nhau 1,3%, giá trị sai số nằm trong giới hạn cho phép là 5%.

Những điểm khác biệt này có thể được giải thích là trong mô phỏng, vật liệu và các điều kiện khác trong mô hình (điều kiện biên, tải trọng...) là lý tưởng hơn so với thực tế thí nghiệm.

b. Kết quả phân tích nứt và phá hoại



Hình 3. Trạng thái phá hoại của bản sàn



Hình 4. Phá hoại do cắt trong thí nghiệm của Genikomsou 2014

Hình 3 thể hiện quá trình phát triển vết nứt và sự phá hoại do nứt trong mô hình mô phỏng. Hình 4 thể hiện trạng thái phá hoại của tấm sàn khi bị cắt trong thí nghiệm của Genikomsou 2014. Dạng phá hoại giữa mô hình mô phỏng và kết quả thí nghiệm cho thấy sự tương đồng. Kết quả này một lần nữa khẳng định tính hợp lệ của mô phỏng số.

2.2. Khảo sát khả năng chịu cắt của sàn BTCT khi thay đổi vật liệu bê tông và cốt thép

2.2.1. Quy đổi cường độ vật liệu giữa các tiêu chuẩn thiết kế

Công thức gần đúng quy đổi từ cường độ chịu nén của bê tông R_b (theo tiêu chuẩn TCVN) sang giới hạn chịu nén f_c' (theo tiêu chuẩn ACI) và quy đổi từ cường độ tính toán chịu kéo R_s (theo tiêu chuẩn TCVN) sang giới hạn chảy f_y (theo tiêu chuẩn ACI).

Xuất phát từ việc đồng bộ hai công thức tính diện tích cốt dọc A_s của cấu kiện chịu uốn (đặt cốt đơn)

Theo tiêu chuẩn ACI

$$A_s = \frac{M_u}{\varphi f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)} \quad (1)$$

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2|M_u|}{0,85 f_c' \varphi b}} \quad (2)$$

Theo tiêu chuẩn TCVN

$$A_s = \frac{M_{gh}}{R_s \left(h_0 - \frac{x}{2}\right)} \quad (3)$$

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2|M_{gh}|}{R_b b}} \quad (4)$$

Ở đây có: $M_u = M_{gh}$, $d = h_0$ $d = h_0$ và φ = 0,9 là hệ số giảm cường độ, lấy theo tiêu chuẩn ACI-318.

Từ đây rút ra được:

$$R_s = \varphi f_y = 0,9 f_y \quad R_s = \varphi f_y = 0,9 f_y \quad (5)$$

$$R_b = 0,85 f_c' \varphi = 0,85.0,9.f_c' = 0,765 f_c' \quad (6)$$

2.2.2. Bê tông

Trong nghiên cứu sử dụng bê tông thường có các thông số lấy theo TCVN 5574-2018 [3], bê tông làm việc trong giới hạn đàn hồi.

Bảng 2. Các thông số vật liệu khai báo cho bê tông

Cấp bền bê tông	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (MPa)	υ	γ (kg/m³)
B20	11,5	0,9	27500	0,2	2350
B25	14,5	1,05	30000	0,2	2350
B30	17	1,15	32500	0,2	2350

Bảng 3 quy đổi cường độ tính toán của vật liệu bê tông theo TCVN 5574-2018 sang tiêu chuẩn EC2.

Bảng 3. Quy đổi cường độ bê tông

Cấp bền bê tông theo TCVN 5574-2018	B20	B25	B30
Cường độ tính toán chịu nén f_c theo EC2 (MPa)	14,95	18,85	22,1
Cường độ tính toán chịu kéo f_t theo EC2 (MPa)	1,2	1,3	1,5

2.2.3. Cốt thép

Các thông số lấy theo [3] như sau:

Bảng 4. Thông số về vật liệu thép

Loại thép	f_y (MPa)	E_s (MPa)	υ	γ (kg/m³)
CB240-T	210	200000	0,3	7850
CB300-T	260	200000	0,3	7850

Bảng 5. Quy đổi thông số tính toán của vật liệu thép

Loại thép	CB240-T	CB300-T
Cường độ tính toán theo TCVN 5574-2018 (MPa)	210	260
Cường độ tính toán theo EC-2 (MPa)	231	286
Mô đun đàn hồi (MPa)	2e5	2e5

2.2.4. Tải trọng tác dụng: Tải tập trung

2.3. Các bài toán khảo sát số

2.3.1. Mục đích

Xác định tải trọng phá hoại (chuyển vị) của sàn bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng tập trung khi xét đến sự thay đổi của các tham số:

- Thay đổi cấp độ bền của bê tông: B20, B25, B30.
- Thay đổi chủng loại cốt thép: CB240-T và CB300-T.

Việc xác định các ứng xử của kết cấu được mô phỏng bằng phần mềm Abaqus với:

- Điểm khảo sát là điểm ở tâm mặt dưới của của tấm.
- Lưới chia có kích thước bước lưới lớn nhất là 20 mm.

2.3.2. Các bài toán

Bảng 6. Các bài toán khảo sát

Bài toán	Vật liệu bê tông	Vật liệu thép
1	B20	CB240-T
2	B25	CB240-T
3	B30	CB240-T
4	B20	CB300-T
5	B25	CB300-T
6	B30	CB300-T

2.3.2.1. Bài toán 1

a. Thông số bài toán

+ Kích thước sàn bê tông cốt thép: (1200x1200x60) mm.

+ Bê tông có cấp độ bền B20, thông số vật liệu như Bảng 2

+ Các lớp thép ngang và dọc đường kính D6 sử dụng thép CB240-T được bố trí ở mặt dưới của tấm sàn với khoảng cách 100 mm.

+ Một cột ngắn kích thước (120x120x50) mm đặt giữa tấm sàn. Tải trọng tác dụng được đặt lên bề mặt của cột.

+ Tấm được kê trên các liên kết ở vị trí cách mép bản sàn 2cm, các nút này được ngăn cản chuyển vị theo phương đứng tương ứng với UY=0.

- Tải trọng tác dụng: tải trọng tập trung. Giá trị tải trọng này tăng theo thời gian. Tải trọng được gia tăng liên tục cho đến khi mô hình bị phá hoại.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Tính toán theo điều kiện: $F \le F_{b,u}$

Trong đó:

F là lực tập trung do ngoại lực;

$F_{b,u}$ là lực tập trung giới hạn mà bê tông có thể chịu được.

Lực giới hạn $F_{b,u} = R_{bt}A_b$

$A_b = uh_0$. A_b là diện tích tiết diện ngang tính toán nằm ở khoảng cách $0,5h_0$, tính từ biên của diện truyền lực tập trung F, với chiều cao làm việc của tiết diện h_0 theo [3].

u là chu vi đường bao của tiết diện ngang tính toán;

h_0 là chiều cao làm việc quy đổi của tiết diện, $h_0 = 0,5(h_{0x} + h_{0y})$, với h_{0x} và h_{0y} là chiều cao làm việc của tiết diện đối với cốt thép dọc nằm theo phương các trục X và Y.

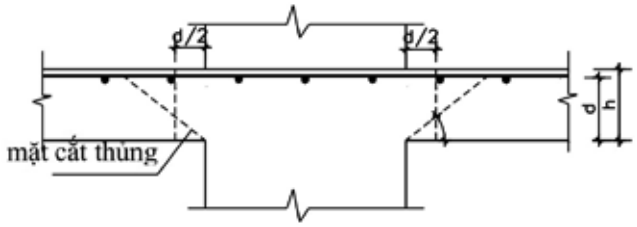
Với thông số của bài toán 1, cấp độ bền bê tông B20, ta có $R_{bt} = 0,9\ Mpa$

Theo [3], ta có kết quả sau:

Bảng 7. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3060

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318



Hình 5. Tiết diện phá hoại theo tiêu chuẩn ACI-318

Tính toán khả năng chịu cắt thủng theo công thức (6) và (7)

$$V_u \le \emptyset V_{uo} \quad (7)$$

Trong đó: V_u là lực gây cắt (cắt tủng) sàn:

$$V_u = \rho\left[l_1 l_2 - 4\left(c + \bar{d}\right)^2\right] \quad (8)$$

Với ϕ = 0,75: Hệ số giảm cường độ khi bê tông chịu cắt theo tiêu chuẩn ACI-318.

V_{uo}: Giá trị khả năng chịu cắt (cắt thủng) cực hạn của sàn phẳng:

$$V_{uo} = u\bar{d}(v_n) \quad (9)$$

Trong đó:

$u = 4(c + \bar{d})$: Chu vi tháp cắt thủng;

$\bar{d} = \frac{\bar{d}_x + \bar{d}_y}{2}$: Chiều cao làm việc trung bình của sàn;

v_n : Cường độ chịu cắt trên một đơn vị diện tích, đơn vị là N/mm², được tính là giá trị nhỏ nhất trong 3 giá trị sau:

$$\min\left\{v_n = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right)\frac{\sqrt{f'_c}}{6}; v_n = \left(\frac{\alpha_s d}{u} + 2\right)\frac{\sqrt{f'_c}}{12}; v_n = \frac{\sqrt{f'_c}}{3}\right\} \quad (10)$$

Trong đó:

$\alpha_s = 40$ đối với cột giữa liên kết với sàn phẳng;

$\beta_c \beta_c$ tỷ số cạnh dài/cạnh ngắn của ô bản;

f'_c Cường độ nén đặc trưng của bê tông (N/mm²).

Với thông số của bài toán 1, từ cấp độ bền bê tông B20, ta có $f'_c = 14,95\ Mpa$. Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có kết quả sau:

Bảng 8. Khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3287

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo tiêu chuẩn EC-2

$$V_{Rd,c} = u_1\bar{d}(v_{Rd,c}) \quad (11)$$

Trong đó:

$V_{Rd,c}$: Khả năng chịu cắt của bê tông.

$u_1 = 4(c + 4\bar{d})$: Chu vi tháp cắt thủng.

$\bar{d} = \frac{d_x + d_y}{2}$: Chiều cao làm việc trung bình của sàn.

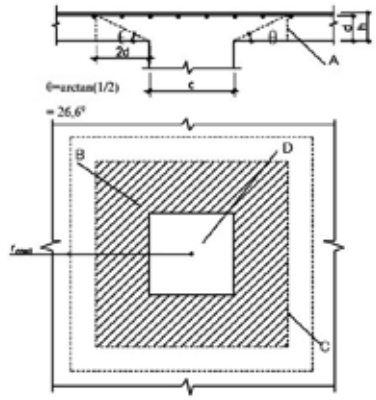
$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c}k(100\rho f_{ck})^{1/3} \quad (12)$$

Với: $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \le 2,0;\ \rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \le 0,02$

ρ_x, ρ_y: hàm lượng cốt thép chịu kéo theo 2 phương vuông góc x và y;

f_{ck}: Cường độ nén đặc trưng của bê tông (N/mm²);

γ_c = 1,5 đối với bài toán thiết kế.



A. Tiết diện kiểm tra cơ sở; B. Diện tích kiểm tra cơ bản A_{cont}

C. Chu vi kiểm tra cơ bản u_1; D. Diện tích chất tải A_{load}

R_{cont} Kích thước tính chu vi kiểm tra mở rộng

Hình 6. Tháp cắt thủng theo tiêu chuẩn EC-2

Bảng 9. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	4,75

Bảng 10. Khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3043

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 11. Khả năng chịu cắt (Bê tông B20, thép CB240-T)

Nội dung khảo sát	**TCVN 5574-2018**	**ACI - 318**	**EC-2**	**Abaqus**
Khả năng chịu cắt (KN)	30,6	32,87	30,43	55,4
Chênh lệch (%)	**0**	**7%**	**1%**	**81%**

2.3.2.2. Bài toán 2

a. Thông số bài toán

Sử dụng bê tông có cấp độ bền B25, thông số vật liệu như Bảng 2. Các thông số khác của mô hình lấy giống Bài toán 1.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Với thông số của bài toán 2, cấp độ bền bê tông B25, ta có $R_{bt} = 1,05\ Mpa$

Theo [3], ta có:

Bảng 12. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3570

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

Với thông số của bài toán 2, từ cấp độ bền bê tông B25, ta có $f'_c = 18,85\ Mpa$ $f'_c = 18,85 MPa$

Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có:

Bảng 13. Khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3690

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

Bảng 14. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	5,14

Bảng 15. Khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3287

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 16. Khả năng chịu cắt với Bê tông B25, thép CB240-T

Nội dung khảo sát	**TCVN 5574-2018**	**ACI - 318**	**EC-2**	**Abaqus**
Khả năng chịu cắt (KN)	35,70	36,90	32,87	62,4
Chênh lệch (%)	**0**	**3%**	**8%**	**75%**

2.3.2.3. Bài toán 3

a. Thông số bài toán

Sử dụng bê tông B30, thông số vật liệu như Bảng 2. Các thông số khác của mô hình lấy giống Bài toán 1.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Với thông số của bài toán 3, cấp độ bền bê tông B30, ta có $R_{bt} = 1{,}15\ Mpa$.

Theo [3], ta có:

Bảng 17. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3910

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

Với thông số của bài toán 3, từ cấp độ bền bê tông B30, ta có $f'_c = 22{,}1\ Mpa$.

Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có:

Bảng 18. Khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3996

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

Bảng 19. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	5,42

Bảng 20. Khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3466

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 21. Khả năng chịu cắt (Bê tông B30, thép CB240-T)

Nội dung khảo sát	**TCVN 5574-2018**	**ACI - 318**	**EC-2**	**Abaqus**
Khả năng chịu cắt (KN)	39,10	39,96	34,66	67,9
Chênh lệch (%)	**0**	**2%**	**11%**	**74%**

2.3.2.4. Bài toán 4

a. Thông số bài toán

Các lớp thép ngang và dọc đường kính D6 sử dụng thép CB300-T được bố trí ở mặt dưới của tấm sàn với khoảng cách 100 mm. Các thông số khác của mô hình lấy giống Bài toán 1.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Với thông số của bài toán 4, bê tông B20, ta có $R_{bt} = 0{,}9\ Mpa$.

Theo [3], ta có:

Bảng 22. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3060

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI – 318

Với thông số của bài toán 4, bê tông B20, có $f'_c = 14{,}95\ Mpa$.

Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có:

Bảng 23. Khả năng chịu cắt của sàn theo tiêu chuẩn ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3287

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo tiêu chuẩn EC-2

Bảng 24. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	4,75

Bảng 25. Khả năng chịu cắt của sàn tiêu chuẩn EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3043

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 26. Khả năng chịu cắt (Bê tông B20, thép CB300-T)

Nội dung khảo sát	**TCVN 5574-2018**	**ACI - 318**	**EC-2**	**Abaqus**
Khả năng chịu cắt (KN)	30,6	32,87	30,43	57,5
Chênh lệch (%)	**0**	**7%**	**1%**	**88%**

2.3.2.5. Bài toán 5

a. Thông số bài toán

Các lớp thép ngang và dọc đường kính D6 sử dụng thép CB300-T được bố trí ở mặt dưới của tấm sàn với khoảng cách 100 mm. Các thông số khác của mô hình lấy giống Bài toán 2.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Với thông số của bài toán 5, cấp độ bền bê tông B25, ta có $R_{bt} = 1{,}05\ Mpa$.

Theo [3], ta có:

Bảng 27. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3570

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI- 318

Với thông số của bài toán 5, từ cấp độ bền bê tông B25, ta có $f'_c = 18{,}85\ Mpa$.

Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có kết quả sau:

Bảng 28. Khả năng chịu cắt của sàn theo tiêu chuẩn ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3690

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

Bảng 29. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	5,14

Bảng 30. Khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3287

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 31. Khả năng chịu cắt (Bê tông B25, thép CB300-T)

Nội dung khảo sát	TCVN 5574-2018	ACI - 318	EC-2	Abaqus
Khả năng chịu cắt (KN)	35,7	36,9	32,87	64,6
Chênh lệch (%)	**0**	**3%**	**8%**	**81%**

2.3.2.6. Bài toán 6

a. Thông số bài toán

Các lớp thép ngang và dọc đường kính D6 sử dụng thép CB300-T được bố trí ở mặt dưới của tấm sàn với khoảng cách 100mm. Các thông số khác của mô hình lấy giống Bài toán 3.

b. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo TCVN 5574:2018

Với thông số của bài toán 6, cấp độ bền bê tông B30, ta có $R_{bt} = 1,15\ Mpa$.

Theo [3], ta có:

Bảng 32. Khả năng chịu cắt của sàn theo [3]

c	h	a_0	h_0	a	u	Ab	Fb,u
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3910

c. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo ACI -318

Với thông số của bài toán 6, từ cấp độ bền bê tông B30, ta có $f'_c = 22,1\ Mpa$.

Sử dụng các công thức từ (7) đến (10), ta có kết quả sau:

Bảng 33. Khả năng chịu cắt của sàn theo ACI-318

c	h	a_0	d	$b_0/4$	b_0	b_0*d	ϕV_{uo}
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3996

d. Tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

Bảng 34. Thông số tính toán khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

ρ_x	ρ_y	ρ	k	γ_c	$C_{Rd,c}$	$v_{Rd,c}$
0,0052	0,0052	0,0052	2	1,5	0,12	5,42

Bảng 35. Khả năng chịu cắt của sàn theo EC-2

c	h	a_0	d	$u_1/4$	u_1	u_1*d	$V_{Rd,c}$
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm2)	(daN)
12	6	1	5	17	68	340	3466

e. Kết quả khảo sát số

Bảng 36. Khả năng chịu cắt (Bê tông B30, thép CB300-T)

Nội dung khảo sát	TCVN 5574-2018	ACI - 318	EC-2	Abaqus
Khả năng chịu cắt (KN)	39,1	39,96	34,66	70
Chênh lệch (%)	**0**	**2%**	**11%**	**79%**

2.3.3. Ảnh hưởng của cường độ bê tông đến khả năng chịu cắt của sàn

Bảng 37. Khả năng chịu cắt của sàn khi thay đổi cường độ bê tông

Nội dung khảo sát	B20, CB240-T	B25, CB240-T	B30, CB240-T
Khả năng chịu cắt (KN)	55,4	62,4	67,9
Gia tăng (%)	**0**	**13%**	**23%**

Bảng 38. Khả năng chịu cắt của sàn khi thay đổi cường độ bê tông

Nội dung khảo sát	B20, CB300-T	B25, CB300-T	B30, CB300-T
Khả năng chịu cắt (KN)	57,5	64,6	70
Gia tăng (%)	**0**	**12%**	**22%**

Bảng 39. Khả năng chịu cắt của sàn khi thay đổi cường độ thép

Nội dung khảo sát	B20, CB240-T	B20, CB300-T
Khả năng chịu cắt (KN)	55.4	57.5
Gia tăng (%)	**0**	**3,8%**

Bảng 40. Khả năng chịu cắt của sàn khi thay đổi cường độ thép

Nội dung khảo sát	B25, B240-T	B25, CB300-T
Khả năng chịu cắt (KN)	62,4	64,6
Gia tăng (%)	**0**	**3,2%**

Bảng 41. Khả năng chịu cắt của sàn khi thay đổi cường độ thép

Nội dung khảo sát	B30, CB240-T	B30, CB300-T
Khả năng chịu cắt (KN)	67,9	70
Gia tăng (%)	**0**	**3%**

Có thể thấy, khi tăng cường thép, khả năng chịu cắt của sàn BTCT tăng từ 3% đến 3,8%.

Từ các kết quả trên có thể rút ra nhận xét: khả năng chịu cắt của sàn tăng đáng kể thi tăng cường độ của bê tông so với việc tăng cường độ của cốt thép.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã trình bày việc nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu BTCT đến khả năng chịu cắt của sàn phẳng bê tông cốt thép theo một số tiêu chuẩn hiện hành và so sánh với kết quả khảo sát số trên phần mềm ABAQUS. Thông qua các kết quả khảo sát trên, ta nhận thấy:

Khả năng chịu cắt của sàn tăng khi tăng cường độ của bê tông. Khi tăng cường độ của cốt thép khả năng chịu cắt của sàn có tăng nhưng không đáng kể. Kết quả này phù hợp với việc xác định khả năng chịu cắt của sàn theo các tiêu chuẩn thiết kế đã trình bày ở trên do các tiêu chuẩn TCVN 5574-2018, tiêu chuẩn ACI-318 chủ yếu chỉ xét đến ảnh hưởng của bê tông, tiêu chuẩn EC-2 cũng đã xét đến ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép trong bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TCVN 3118:1993, Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén.

[2] TCVN 5726:1993, Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ lăng trụ và modun đàn hồi khi nén tĩnh.

[3] TCVN 5574:2018, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế.

[4] Alam, A.K.M Jahangir, Punching Shear Behavior of Reinforcement Concrete Slabs, 1997.

[5] Aikaterini S. Genikomsou and Maria Anna Polak, Finite Element Analysis of a Reinfoerced Concrete Slab-Column Connection using Abaqus, Proceedings of Structures Congress 2014, pp. 813–823, 2014. doi: 10.1061/9780784413357.072.

[6] Aikaterini S. Genikomsou and Maria Anna Polak, Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS, Engineering Structures, vol. 98, pp. 38-48, 2015. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016.

[7] ABAQUS, Version, "6.13, Analysis User's Manual", Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI. 2013.

[8] ABAQUS, Version, "6.13, Theory Guide", Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, 2013.

[9] Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14). ACI Committee 318, 2014.

[10] Carreira, Domingo JChu, Kuang-Han, "Stress-strain relationship for reinforced concrete in tension", Journal Proceedings, vol. 83, no. 1, pp. 21–28, 1986.

[11] CEB-FIP, CEBFIP, "Model code 1990", Comite Euro- International Du Beton, Paris, 1991.

[12] Eurocode 2, Design of concrete structures.CEN on 8 July 2004.

■ Ngày nộp bài: 10/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 17/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Một số nội dung báo cáo và tính toán cột composite sử dụng cho nhà cao tầng, trụ cầu theo tiêu chuẩn AISC 360 và ACI 318

Selected aspects of the design and analysis of composite columns for high - rise buildings and bridge piers according to AISC 360 and ACI 318

> TS NGUYỄN LỘC KHA
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: khanl_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Cột composite thép-bê tông là cấu kiện kết cấu cứng, bền và dẻo, có thể thay thế hiệu quả cho các hệ khung thép hoặc bê tông cốt thép truyền thống. Đặc tính làm việc và thiết kế của cột composite có điểm chung với cột kết cấu thép và cột bê tông cốt thép, đồng thời mang lại những lợi ích và thách thức riêng. Cột (composite) thép-bê tông đã phát triển đáng kể trong vài thập kỷ qua và tiếp tục được hoàn thiện nhờ một số nghiên cứu và ứng dụng thực tế trên toàn thế giới. Thuật ngữ "cột composite" trong bài báo này chỉ giới hạn ở cấu kiện cột composite bê tông bọc dầm thép và composite cột thép rỗng được nhồi bê tông. Cột composite đã được chứng minh là đặc biệt dẻo dai có cường độ cao và chịu tác động của động đất.

Từ khóa: Vật liệu composite; kết cấu bê tông cốt thép; kết cấu thép; nhà cao tầng.

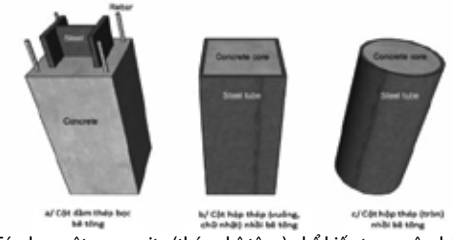
ABSTRACT

Steel-concrete composite columns are structural members characterized by high stiffness, strength and ductility and can serve as effective alternatives to conventional steel or reinforced concrete framing systems. The structural behavior and design principles of composite columns share similarities with both structural steel columns and reinforced concrete columns, while also presenting unique advantages and challenges. Steel-concrete composite columns have undergone significant development over the past few decades and continue to be refined through extensive research and practical applications worldwide. In this paper, the term "composite column" is limited to steel sections encased in concrete and concrete-filled hollow steel columns. Composite columns have been proven to possess exceptional ductility and high strength, particularly under seismic actions and blast loading.

Keywords: Composite materials; reinforced concrete structures; steel structures; high-rise buildings.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kỷ nguyên của các tòa nhà siêu cao tầng và hạ tầng phức hợp, sự dịch chuyển từ hệ thống bê tông cốt thép (RC) truyền thống sang kết cấu liên hợp (composite) là một bước tiến chiến lược nhằm tối ưu hóa hiệu suất chịu tải và không gian kiến trúc. Do đó, đối với các kỹ sư tư vấn, việc hiểu rõ triết lý thiết kế không chỉ đảm bảo tính an toàn cho công trình mà còn tối đa hóa lợi ích kinh tế cho chi phí đầu tư. Bài báo trình bày một số hướng dẫn kỹ thuật chi tiết về việc thiết kế cột composite (cột thép liên hợp với bê tông cốt thép) theo tiêu chuẩn AISC và tiêu chuẩn ACI-318. Nội dung tập trung vào hai phương pháp phân tích là phân tích trực tiếp và phân tích theo chiều dài hiệu dụng, đồng thời giải thích cách tính toán cường độ chịu tải khả dụng cho các cấu kiện chịu nén, uốn và chịu lực kết hợp. Bài báo cũng trình bày các phương pháp xác định độ bền mặt cắt ngang nhằm đảm bảo an toàn cho kết cấu. Biểu đồ tương tác lực cũng được trình bày để hỗ trợ trong việc xử lý các giới hạn vật liệu và yêu cầu ổn định của cột. Cuối cùng, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc điều chỉnh độ cứng thành phần do ảnh hưởng của nứt bê tông và các hiệu ứng bậc hai trong quá trình sử dụng lâu dài.



Hình 1. Các dạng cột composite (thép - bê tông) phổ biến trong xây dựng

2. PHÂN TÍCH NỘI LỰC YÊU CẦU, SỨC KHÁNG VÀ HIỆU ỨNG TƯƠNG TÁC THEO TIÊU CHUẨN AISC

2.1. Tổng quan về cơ sở thiết kế cột theo tiêu chuẩn AISC

Triết lý thiết kế cho cột thép liên hợp bê tông tương tự như đối với cột là thép hình. Với mục tiêu chính là không để các trạng thái giới hạn về cường độ cũng như TTGH về sử dụng nào bị vượt quá khi kết cấu chịu các tổ hợp tải trọng tác dụng. Tiêu chuẩn AISC cho phép kỹ sư lựa chọn hai lộ trình tính toán:

- Phương pháp LRFD: Thiết kế đạt yêu cầu khi cường độ thiết kế lớn hơn hoặc bằng cường độ tải trọng yêu cầu $\emptyset R_n \geq R_u$.

- Phương pháp ASD: Thiết kế đạt yêu cầu khi cường độ cho phép lớn hơn hoặc bằng cường độ cho phép (yêu cầu) $R_n/\Omega \geq R_a$.

Tính ổn định của hệ thống phụ thuộc mật thiết vào việc kiểm soát độ cứng để hạn chế các hiệu ứng bậc 2 (như hiệu ứng $P-\Delta$; $P-\delta$).

Dưới đây là bản chuẩn hóa thuật ngữ theo AISC Design Guide 6.

Bảng 1. Chuẩn hóa thuật ngữ theo AISC Design Guide 6

Thuật ngữ	Phương pháp LRFD	Phương pháp ASD
Cường độ yêu cầu	R_u: Dựa trên tổ hợp tải trọng theo LRFD	R_a: Dựa trên tổ hợp tải trọng ASD
Cường độ sẵn có	$\emptyset R_n$: Cường độ thiết kế	R_n/Ω: Cường độ cho phép
Hệ số điều chỉnh	Hệ số sức kháng $\emptyset$	Hệ số an toàn Ω

2.2. Phân tích xác định cường độ yêu cầu và hiệu ứng ổn định

Việc xác định nội lực thông qua phân tích đàn hồi phải xem xét đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định của cả hệ thống. Đối với cột coposite, sự suy giảm độ cứng do nứt của bê tông là yếu tố đặc thù quan trọng.

2.2.1. Các yếu tố ảnh hưởng lớn đến ổn định cần phải được phân tích một cách bao quát

- Biến dạng: Uốn, cắt và biến dạng dọc trục của cấu kiện và liên kết.
- Hiệu ứng bậc 2: Bao gồm hiệu ứng $P-\Delta$ (đối với tổng thể khung) và hiệu ứng $P-\delta$ (đối với cấu kiện riêng rẽ).
- Khiếm khuyết hình học: Các sai lệch ban đầu của khung và của cấu kiện.
- Suy giảm độ cứng do không đàn hồi: Do sự chảy dẻo của thép và đặc biệt là sự nứt của bê tông.
- Sự không chắc chắn: Các sai số về cường độ và độ cứng của hệ thống.

2.2.2. So sánh đặc tính độ cứng trong phân tích kết cấu

Sự khác biệt về độ cứng uốn (EI) và độ cứng dọc trục (EA) giữa hai phương pháp phân tích trực tiếp và phương pháp chiều dài hiệu dụng được tóm tắc theo bảng sau:

Bảng 2. Đặc tính (EI) và (EA) theo phương pháp (DAM) và (ELM)

Đặc tính	Phương pháp phân tích trực tiếp (DAM)	Phương pháp phân tích theo chiều dài hiệu dụng của cột (ELM)
Độ cứng uốn (EI)	$0{,}8\tau_b.(EI)_{eff} = 0{,}64(EI)_{eff}$	$(EI)_{eff}$
Độ cứng dọc trục (EA)	$0{,}8.(E_s.A_s + E_s.A_{sr} + E_c.A_c)$	$E_s.A_s + E_s.A_{sr} + E_c.A_c$
Cường độ nén (P_n)	Tính theo chiều dài hình học "L"	Tính theo chiều dài hiệu dụng "KL"

Trong phương pháp phân tích trực tiếp, hệ số giảm 0,8 được áp dụng cho cả độ cứng dọc trục (EA) và độ cứng uốn (EI). Ngoài ra, hệ số $\tau_b = 0{,}8$ được quy định cho hầu hết các trường hợp. Tuy nhiên, đối với các cột nhạy cảm với ổn định (tải trọng dọc trục thấp, nhưng mô-men uốn lại cao), nơi hiện tượng nứt bê tông trở nên nghiêm trọng. AISC khuyến cáo nếu $P_r \leq 0{,}15P_{no}$ thì nên cân nhắc sử dụng $\tau_b = 0{,}4$ để phản ảnh chính xác sự suy giảm độ cứng uốn [6].

2.3. Xác định cường độ sẵn có của tiết diện và cấu kiện

2.3.1. Độ cứng hiệu dụng và phương pháp xác định cường độ

Để tính toán tải trọng đàn hồi (P_e), độ cứng hiệu dụng $(EI)_{eff}$ phải xét đến sự đóng góp của bê tông qua hệ số "giảm" C_1.

Công thức tính độ cứng hiệu dụng như sau:

$$(EI)_{eff} = E_sI_s + E_sI_{sr} + C_1E_cI_c \quad (1)$$

Trong đó:

$$C_1 = 0{,}25 + 3.\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) \leq 0{,}7 \quad (2)$$

Các phương pháp xác định cường độ danh định của tiết diện theo AISC [2]:

- Phương pháp phân phối ứng suất dẻo: Giả định ứng suất thép đạt đến F_y và bê tông nén đạt đến $0{,}85f_c'$ hoặc $0{,}95f_c'$ (đối với ống thép tròn nhồi bê tông), phương pháp này chỉ xét cho tiết diện liên hợp đặc.

- Phương pháp tương thích biến dạng: Được khuyến nghị sử dụng cho các tiết diện không đối xứng hoặc khi thép không thể hiện hành vi đàn hồi dẻo. Nó tương tự như phương pháp xác định cường độ uốn dọc trục trong ACI-318 với giả định biến dạng nén cực hạn của bê tông $\varepsilon_{cu} = 0{,}003$ [1].

- Phương pháp phân phối ứng suất đàn hồi: Là phương pháp dựa trên giới hạn đàn hồi của vật liệu. Ứng suất tỉ lệ thuận với biến dạng (với giả thiết bỏ qua bê tông vùng chịu kéo).

- Phương pháp ứng suất - biến dạng hiệu dụng: Xem xét rõ ràng các hiệu ứng nứt cục bộ, chảy dẻo, ứng suất dư và sự nứt, nở của bê tông.

2.3.2. Cường độ nén danh định và ảnh hưởng chiều dài

Cường độ nén danh định không xét chiều dài (P_{no}) được xác định theo công thức sau:

$$P_{no} = A_sF_y + A_{sr}F_{yr} + 0{,}85f_c'A_c \quad (3)$$

Để xét P_n khi có xét đến hiện tượng oằn của cột, phải so sánh đến tỉ số P_{no}/P_e

+ Khi $P_{no}/P_e \leq 2{,}25 \implies P_n = P_{no}.\left[(0{,}658)^{P_{no}/P_e}\right]$ (4)

+Khi $P_{no}/P_e > 2{,}25 \implies P_n = 0{,}877.P_e$ (5)

2.3.3. Hệ số sức kháng $\emptyset$ và hệ số an toàn Ω

Bảng 3. Hệ số giảm độ bền $\emptyset$ và hệ số an toàn Ω theo LRFD và ASD

Trạng thái giới hạn	LRFD ($\emptyset$)	ASD (Ω)
Nén dọc trục	0,75	2,00
Kéo dọc trục	0,90	1,67
Uốn	0,90	1,67

2.4. Biểu đồ tương tác và thiết kế chịu lực kết hợp "nén-uốn"

2.4.1. Phương trình tương tác: Phương trình tối ưu hơn cho cột composite, dựa trên điểm cân bằng P_{cc}

Nếu $P_r < P_{cc}$:

$$\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1{,}0 \quad (6)$$

Nếu $P_r \geq P_{cc}$:

$$\frac{P_r - P_{cc}}{P_c - P_{cc}} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1{,}0 \quad (7)$$

Trong đó:

$P_{cc} = \emptyset.\chi.P_C \quad theo\ (LRFD)\ hoặc\ P_{cc}$
$= \chi.P_C/\Omega\ ;\ \text{với}\ \chi = P_n/P_{no} \quad (theo\ ASD)$

- Khi uốn hai phương (đa trục) thì còn phụ thuộc vào hình dáng không gian (α)

Nếu $P_r < P_{cc}$:

$$\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right)^{\alpha} \leq 1{,}0 \qquad (8)$$

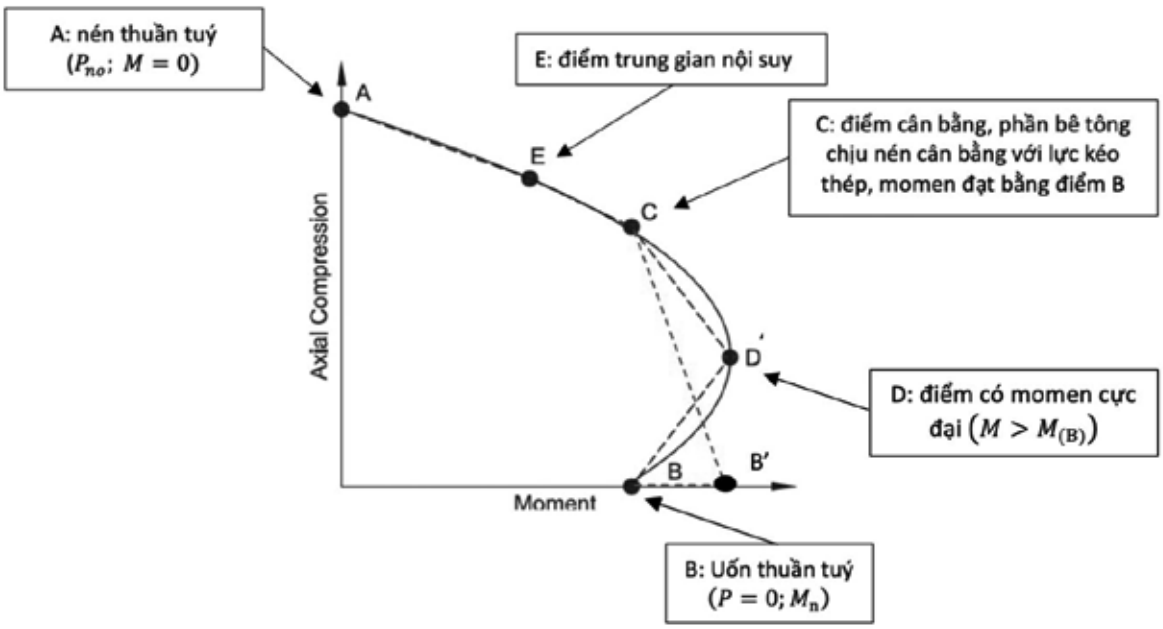
Nếu $P_r \geq P_{cc}$:

$$\frac{P_r - P_{cc}}{P_c - P_{cc}} + \left[\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right)^{\alpha}\right]^{\frac{1}{\alpha}} \leq 1{,}0 \qquad (9)$$

$\alpha = 1{,}0$: Bề mặt phẳng; $\alpha = 1{,}25$: Cột lõi là dầm thép bọc bê tông; $\alpha = 1{,}5$: Cột thép ống (vuông, chữ nhật) nhồi bê tông; $\alpha = 2{,}0$: Cột thép ống tròn nhồi bê tông.

2.4.2. Phân tích điểm "D" và uốn đa trục

Biểu đồ tương tác được xây dựng qua các điểm: Điểm "A" (nén thuần tuý); điểm "B" (uốn thuần tuý) và điểm "C" (điểm cân bằng). Các chuyên gia đều lưu ý về điểm "D" điểm có mô-men cực đại thường bị loại bỏ. Lý do là việc áp dụng các phép biến đổi đơn giản cho hiệu ứng chiều dài đối với điểm "D" có thể dẫn đến cường độ danh định của cấu kiện nằm ngoài giới hạn cường độ danh định của tiết diện, gây mất an toàn [5].



Hình 2. Đường cong biểu đồ tương tác ($P_u - M_u$)

Đường cong liên tục đòi hỏi phải tính tích phân phức tạp, trong thực hành AISC cho phép nối các điểm A, E. thành đa giác (đường đứt gãy)

2.5. Các giới hạn vật liệu và yêu cầu cấu tạo đặc thù [4]

2.5.1. Giới hạn về vật liệu

- Với bê tông có $W_c = 2300 - 2500\ kg/m^3$ thì $25MPa \leq f'_c \leq 70MPa$;
- Với bê tông nhẹ: $W_c = 2100\ kg/m^3$ thì $25MPa \leq f'_c \leq 40MPa$;
- Với thép: $F_y \leq 520MPa$.
- Thép gia cường (cốt thép): $F_y \leq 520MPa$

2.5.2. Yêu cầu cho cột composite dầm thép được bọc bê tông

- Diện tích thép hình tối thiểu > 1% diện tích tiết diện tổng.
- Diện tích cốt thép dọc tối thiểu > 0,4% diện tích tiết diện tổng.

2.5.3. Đối với cấu kiện chịu uốn lớn hoặc tải trọng nén thấp

Khi tải trọng nén $P_u \leq 0{,}1P_n$, cấu kiện phải được phân loại kiểm soát bởi kéo khống chế theo ACI-318. Điều này yêu cầu đánh giá vị trí trục trung hòa, để đảm bảo độ giãn dài ($\mathcal{E}_s$) của cốt thép đủ lớn nhằm duy trì tính dẻo cho cột [3].

3. KẾT LUẬN

Có thể nói, bản chất của thiết kế liên hợp (composite) là một sự hài hòa tinh tế: Lấy độ cứng của thép bù đắp cho sự nứt nẻ của bê tông, dùng sức nén của bê tông để kìm hãm sự mất ổn định hình học của thép; tăng cường độ cứng của hệ thống, tối ưu hoá vật liệu và không gian kiến trúc, đồng thời kiểm soát ổn định tuyệt vời.

- Phương pháp phân tích trực tiếp (DAM) là phương pháp ưu việt, được khuyến nghị mạnh mẽ vì khả năng xử lý hiện tượng "cột nghiêng" và sự phi tuyến của vật liệu một cách tường minh qua hệ số giảm độ cứng $(0{,}64EI)_{eff}$ và $(0{,}8EA)$.
- Nên sử dụng các bảng tra cứu của tiêu chuẩn AISC để xác định chính xác các điểm (A, B, C) trước khi xây dựng biểu đồ tương tác ($P - M$).
- Luôn kiểm tra an toàn về ổn định từ điều kiện $0{,}15P_{no}$ để quyết định việc giảm thêm độ cứng uốn ($\tau_b = 0{,}4$) khi cột chịu tải trọng dọc trục thấp nhưng có xu hướng mất ổn định cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] American Concrete Institute (ACI). Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Code 318-19. ACI, Detroit, MI, 2019.

[2] AISC. Steel contruction manual,16th Ed., American Institute of Steel Contruction, 2023.

[3] ACI. Building code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-19, American Concrete Institute, 2019.

[4] ASTM. Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Stell Structural Tubing in Rounds and Shapes, 2023.

[5] AISC Design Guide 6, 2nd ED./Composite Column Design.

[6] AISC-2025 American Institute of Steel Contruction.

■Ngày nhận bài: 10/8/2026 ■Ngày sửa bài: 22/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 03/9/2026

Thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa rỗng thoát nước sử dụng nhựa đường polymer và đánh giá khả năng kháng hằn lún trong điều kiện Việt Nam

Mix design and rutting resistance of polymer-modified porous asphalt for Vietnamese conditions

> **TS ĐỖ TIẾN THỌ*, TS NGUYỄN HUỲNH TẤN TÀI**
GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP Hồ Chí Minh
*Email: thodt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế và đánh giá tính năng của hỗn hợp bê tông nhựa rỗng thoát nước (BTNR) cỡ hạt danh định 12,5 mm sử dụng nhựa đường polymer theo TCVN 13048:2024. Năm mức hàm lượng nhựa từ 4,1% đến 6,1% được khảo sát thông qua các chỉ tiêu độ rỗng dư, độ ổn định Marshall, độ tổn thất Cantabro và độ chảy nhựa. Kết quả cho thấy độ tổn thất Cantabro quyết định giới hạn dưới, trong khi độ chảy nhựa và độ rỗng dư khống chế giới hạn trên của hàm lượng nhựa; hàm lượng nhựa tối ưu được xác định là 4,80% theo khối lượng hỗn hợp. Tại hàm lượng này, hỗn hợp có độ rỗng dư 19,42%, độ rỗng liên thông 15,77%, hệ số thấm 0,152 cm/s, độ ổn định Marshall 8,41 kN, độ ổn định còn lại 92,4% và độ tổn thất Cantabro 8,12%, đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn. Thí nghiệm vệt hằn bánh xe trong nước ở 50°C cho độ sâu vệt hằn trung bình 6,2 mm sau 20.000 chu kỳ, chỉ bằng khoảng 50% giới hạn cho phép 12,5 mm, phần lớn phát sinh trong giai đoạn cố kết ban đầu, và không xuất hiện điểm bong tróc. Kết quả khẳng định hỗn hợp thiết kế cân bằng tốt giữa khả năng thoát nước, độ bền chống bong bật và khả năng kháng hằn lún.

Từ khóa: Bê tông nhựa rỗng thoát nước; nhựa đường polymer; hàm lượng nhựa tối ưu; độ tổn thất Cantabro; độ chảy nhựa; vệt hằn bánh xe.

ABSTRACT

This study presents the design and performance evaluation of a 12.5 mm nominal maximum aggregate size porous asphalt (PA) mixture with polymer-modified binder in accordance with TCVN 13048:2024. Five binder contents ranging from 4.1% to 6.1% were evaluated in terms of air voids, Marshall stability, Cantabro loss and draindown. The results show that the Cantabro loss governs the lower bound, whereas the draindown and air voids govern the upper bound of the binder content; the optimum binder content was determined as 4.80% by weight of mixture. At this content, the mixture exhibited air voids of 19.42%, interconnected voids of 15.77%, a laboratory permeability of 0.152 cm/s, a Marshall stability of 8.41 kN, a retained stability of 92.4% and a Cantabro loss of 8.12%, satisfying the specification. The Hamburg wheel-tracking test in water at 50°C yielded an average rut depth of 6.2 mm after 20,000 cycles, about half of the 12.5 mm limit, most of which developed during the initial densification stage, with no stripping inflection point. The designed mixture provides a good balance between drainage capacity, raveling resistance and rutting resistance.

Keywords: Porous asphalt; polymer-modified binder; optimum binder content; Cantabro loss; draindown; Hamburg wheel-tracking test.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

BTNR hay bê tông nhựa cấp phối hở (Porous Asphalt - PA; Open-Graded Friction Course - OGFC), là hỗn hợp có độ rỗng dư lớn với hệ thống lỗ rỗng liên thông. Cấu trúc này được hình thành từ cấp phối hở, trong đó cốt liệu thô tạo bộ khung chịu lực tiếp xúc hạt - hạt, còn lượng hạt mịn được hạn chế để duy trì các khoảng rỗng. Lớp BTNR thường được rải với chiều dày mỏng trên lớp bê tông nhựa chặt (BTNC) không thấm nước; nước mưa thấm qua lớp mặt, chảy ngang trong hệ thống lỗ rỗng và thoát ra lề đường thay vì tạo thành màng nước trên bề mặt như mặt đường BTNC (Hình 1) [1, 4].

Hình 1. Sơ đồ nguyên lý thoát nước của mặt đường BTNC (trái) và mặt đường BTNR (phải) khi trời mưa

Nhờ cơ chế thoát nước này, BTNR mang lại nhiều lợi ích về an toàn và môi trường (Hình 2). Thứ nhất, nước được thoát nhanh khỏi vùng tiếp xúc giữa lốp xe và mặt đường nên giảm nguy cơ trượt nước (hydroplaning) và duy trì sức kháng trượt khi trời mưa; lượng nước bị bánh xe cuốn lên cũng giảm, hạn chế hiện tượng bắn tóe, tạo sương nước và phản chiếu ánh đèn vào ban đêm, qua đó cải thiện tầm nhìn cho người lái xe [1, 4]. Thứ hai, không khí bị nén giữa các rãnh gai lốp và mặt đường được giải phóng vào hệ thống lỗ rỗng, đồng thời một phần năng lượng âm được hấp thụ trong cấu trúc rỗng, làm giảm tiếng ồn phát sinh từ tương tác lốp xe - mặt đường [2, 4]. Thứ ba, bề mặt với cấu trúc vĩ mô thô (macrotexture) do cốt liệu thô tạo nên giúp lốp tiếp xúc trực tiếp với các hạt cốt liệu, duy trì độ nhám và khả năng bám của bánh xe [3, 4]. Với những lợi ích này, BTNR đã được sử dụng từ nhiều thập kỷ trước tại Hoa Kỳ dưới dạng lớp ma sát cấp phối hở [1], được áp dụng rộng rãi trên mạng lưới đường cao tốc ở Hà Lan [2] và ngày càng được nghiên cứu, ứng dụng ở nhiều quốc gia khác, đặc biệt tại các khu vực có lượng mưa lớn [3, 4].

Hình 2. Các cơ chế cải thiện tính năng khai thác của mặt đường BTNR: *(a) thoát nước, giảm trượt nước; (b) hấp thụ âm, giảm tiếng ồn; (c) bề mặt nhám, tăng khả năng bám của lốp*

Tuy nhiên, độ rỗng cao cũng làm BTNR nhạy cảm hơn với tác động của tải trọng và môi trường. Số điểm tiếp xúc giữa các hạt ít và màng nhựa tiếp xúc trực tiếp với không khí, nước làm hỗn hợp dễ bị bong bật hạt (raveling), lão hóa nhanh và suy giảm dính bám. Ngược lại, tăng hàm lượng hạt mịn hoặc hàm lượng nhựa có thể cải thiện liên kết nhưng làm giảm thể tích và tính liên thông của lỗ rỗng, đồng thời gây nguy cơ chảy nhựa trong quá trình sản xuất, vận chuyển [3, 4]. Bên cạnh đó, lỗ rỗng có thể bị bít tắc dần bởi bụi, cát và các hạt mịn trong quá trình khai thác, làm suy giảm khả năng thoát nước theo thời gian; do đó hỗn hợp cần được thiết kế với độ rỗng dư và độ rỗng liên thông đủ lớn để duy trì chức năng lâu dài [2, 4]. Vì vậy, thiết kế BTNR thực chất là bài toán cân bằng giữa chức năng thoát nước và độ bền khai thác. Khác với bê tông nhựa chặt, hàm lượng nhựa tối ưu của BTNR thường được xác định từ đồng thời các chỉ tiêu độ rỗng dư, độ tổn thất Cantabro và độ chảy nhựa, thay cho các chỉ tiêu Marshall truyền thống [3, 4].

Loại chất kết dính cũng ảnh hưởng đáng kể đến độ bền của BTNR. Nhựa đường polymer có độ nhớt, độ đàn hồi và khả năng dính bám cao hơn nhựa đường thông thường, cho phép tạo màng nhựa dày hơn mà không chảy nhựa, qua đó nâng cao khả năng chống bong bật, chống tác động của nước và kháng biến dạng ở nhiệt độ cao [4]. Tại Việt Nam, điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa với nhiệt độ mặt đường cao, lượng mưa lớn, cùng với lưu lượng và tải trọng xe ngày càng tăng đặt ra yêu cầu cao đối với cả khả năng thoát nước và độ bền của lớp mặt. Nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả cho thấy BTNR sử dụng nhựa đường thông thường có tính năng cơ học kém hơn đáng kể so với bê tông nhựa chặt và cần sử dụng nhựa đường cải tiến để bảo đảm độ bền trong điều kiện nhiệt độ cao, tải trọng nặng ở khu vực phía Nam [5]. Thí nghiệm vệt hằn bánh xe cũng đã được nhóm tác giả sử dụng để đánh giá khả năng kháng hằn lún của bê tông nhựa chặt dùng nhựa polymer [6]. Bên cạnh đó, sau phiên bản TCVN 13048:2020, TCVN 13048:2024 [7] đã quy định các yêu cầu đối với lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa rỗng thoát nước, tạo cơ sở pháp lý cho việc áp dụng loại vật liệu này. Tuy nhiên, dữ liệu thực nghiệm về thiết kế và tính năng của BTNR sử dụng vật liệu trong nước theo tiêu chuẩn này, đặc biệt là khả năng kháng hằn lún trong điều kiện ngập nước, vẫn còn hạn chế.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này thiết kế hỗn hợp BTNR cỡ hạt danh định 12,5 mm sử dụng nhựa đường polymer và cốt liệu trong nước theo TCVN 13048:2024 [7]. Vai trò của từng chỉ tiêu trong việc xác định hàm lượng nhựa tối ưu được phân tích; hỗn hợp tại hàm lượng nhựa tối ưu được kiểm chứng các chỉ tiêu cơ lý, khả năng thoát nước và đánh giá khả năng kháng hằn lún bằng thí nghiệm vệt hằn bánh xe (VHBX) trong nước ở 50°C.

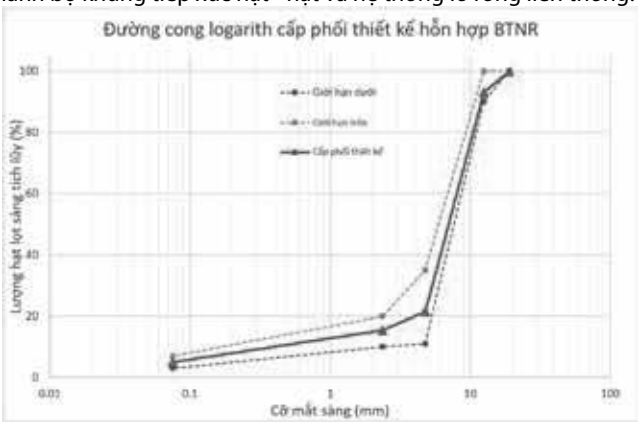
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Vật liệu

Cốt liệu, bột khoáng và nhựa đường sử dụng trong nghiên cứu được cung cấp bởi Công ty Cổ phần Đầu tư Xây dựng BMT.

2.1.1. Cốt liệu

Đường cong cấp phối thiết kế có cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm, nằm trong miền giới hạn quy định của TCVN 13048:2024 [7] (Hình 3). Cấp phối có hàm lượng cốt liệu thô cao, bảo đảm hình thành bộ khung tiếp xúc hạt - hạt và hệ thống lỗ rỗng liên thông.



Hình 3. Đường cong cấp phối thiết kế hỗn hợp BTNR

2.1.2. Chất kết dính

Chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu này là nhựa đường polymer PMB-S được cung cấp bởi Công ty Cổ phần Đầu tư Xây dựng BMT. Kết quả thí nghiệm cho thấy nhựa có độ kim lún ở 25°C là 47,5 (0,1 mm), nhiệt độ hóa mềm 87,2°C, độ kéo dài 78,4 cm, khối lượng riêng 1,039 g/cm^3, độ dính bám với đá cấp 4, độ đàn hồi ở 25°C 80,2% và độ nhớt Brookfield ở 135°C 2,77 Pa·s. Sau thí nghiệm TFOT, tổn thất khối lượng là 0,031% và tỷ lệ độ kim lún còn lại 83,8%; chênh lệch nhiệt độ hóa mềm sau 48 giờ lưu trữ ở 163°C là 0,6°C. Các chỉ tiêu này đáp ứng yêu cầu đối với nhựa đường polymer quy định trong TCVN 13048:2024 [7].

2.2. Phương pháp thí nghiệm

2.2.1. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu

Hàm lượng nhựa tối ưu (OBC) được xác định trên năm mức hàm lượng nhựa 4,1%, 4,6%, 5,1%, 5,6% và 6,1% theo khối lượng hỗn hợp, mỗi mức ba mẫu. Mẫu hình trụ đường kính 101,6 mm, chiều cao khoảng 63,5 mm được chế tạo và đầm chặt bằng búa Marshall theo quy định của TCVN 13048:2024 [7] (2×50 chày). Các chỉ tiêu được xác định gồm: tỷ trọng lớn nhất ở trạng thái rời G_{mm} theo TCVN 8860-4:2011 [9]; tỷ trọng khối G_{mb}, từ đó tính độ rỗng dư (Va), độ rỗng cốt liệu (VMA), độ rỗng lấp đầy (VFA), lượng nhựa hấp phụ (P_{ba}) và hàm lượng nhựa có hiệu (P_{be}); độ ổn định Marshall ở 60°C theo TCVN 8860-1:2011 [8]; độ tổn thất Cantabro theo TCVN 11415:2016 [10] và độ chảy nhựa. Các yêu cầu kỹ thuật được đối chiếu theo TCVN 13048:2024 [7].

2.2.2. Kiểm chứng tại hàm lượng nhựa tối ưu

Các mẫu chế tạo tại OBC được thí nghiệm lại các chỉ tiêu trên, bổ sung độ ổn định Marshall sau khi ngâm mẫu 24 giờ ở 60°C để xác định độ ổn định còn lại, độ rỗng liên thông và hệ số thấm trong phòng theo các phương pháp quy định trong TCVN 13048:2024 [7].

2.2.3. Thí nghiệm vệt hằn bánh xe

Thí nghiệm VHBX được thực hiện theo TCVN 13899:2023 [11], tương tự nghiên cứu trước [6] nhưng trong môi trường nước, trên thiết bị Hamburg (Hamburg Wheel Tracking - HWT) với hai mẫu dạng tấm kích thước 320 mm × 260 mm × 60 mm, chế tạo tại OBC. Mẫu được ngâm trong nước ở nhiệt độ 50°C trong suốt quá trình thí nghiệm, chịu tác dụng lặp của hai bánh xe thép (trái và phải) chuyển động qua lại trong 40.000 lượt, tương đương 20.000 chu kỳ tải (1 chu kỳ = 2 lượt). Điều kiện ngập nước ở nhiệt độ cao đồng thời phản ánh khả năng kháng biến dạng dẻo và khả năng chống bong tróc do nước của hỗn hợp; đây là điều kiện bất lợi đối với BTNR vì nước lưu thông trực tiếp trong hệ thống lỗ rỗng liên thông. Thiết bị ghi liên tục độ sâu vệt hằn và nhiệt độ nước theo số lượt tác dụng; từ đường cong thu được, độ sâu vệt hằn tại các mốc 5.000, 10.000 và 20.000 chu kỳ, tốc độ phát triển vệt hằn trong giai đoạn ổn định và sự xuất hiện của điểm bong tróc được xác định.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

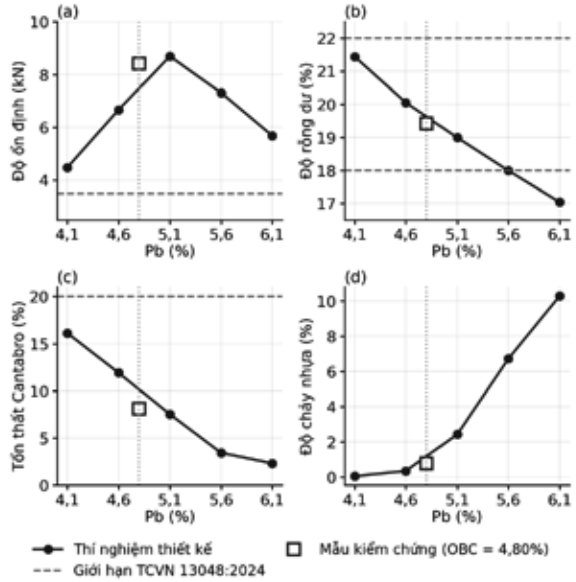
3.1. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu

Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý tại năm mức hàm lượng nhựa được tổng hợp trong Bảng 1 và biểu diễn trên Hình 4; các đặc trưng thể tích được trình bày trong Bảng 2. Mỗi giá trị là trung bình của ba mẫu.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp BTNR với các hàm lượng nhựa khác nhau

Mẫu số	Hàm lượng nhựa theo khối lượng hỗn hợp	Hàm lượng nhựa theo khối lượng cốt liệu	Độ ổn định Marshall	Độ rỗng dư	Tổn thất Cantabro	Khối lượng thể tích	Độ chảy nhựa
	(%)	(%)	(kN)	(%)	(%)	(g/cm^3)	(%)
1	4,1	4,28	4,47	21,45	16,11	1,990	0,05
2	4,6	4,82	6,67	20,07	11,93	2,017	0,35
3	5,1	5,37	8,70	19,00	7,57	2,031	2,43
4	5,6	5,93	7,30	17,98	3,46	2,044	6,73
5	6,1	6,50	5,70	17,05	2,34	2,057	10,29
Yêu cầu kỹ thuật [7]/ *Spec.*			≥ 3,5	18 ÷ 22	≤ 20	-	-
Hàm lượng nhựa tối ưu/ ***OBC***			Theo khối.lượng hỗn hợp: 4,80%		Theo k.lượng cốt liệu: 5,04% *by wt. of Agg.*		

Độ ổn định Marshall tăng từ 4,47 kN lên 8,70 kN khi hàm lượng nhựa tăng từ 4,1% đến 5,1%, sau đó giảm xuống 5,70 kN tại 6,1% (Hình 4a). Khi hàm lượng nhựa thấp, màng nhựa mỏng chưa đủ liên kết các điểm tiếp xúc giữa các hạt cốt liệu thô; khi vượt quá giá trị cực đại, nhựa dư tạo màng dày đóng vai trò bôi trơn, làm giảm ma sát nội. Tất cả các mẫu đều đạt yêu cầu ≥ 3,5 kN [7], do đó độ ổn định Marshall không phải là chỉ tiêu khống chế trong phạm vi khảo sát.



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa đến: *(a) độ ổn định Marshall; (b) độ rỗng dư; (c) độ tổn thất Cantabro; (d) độ chảy nhựa*

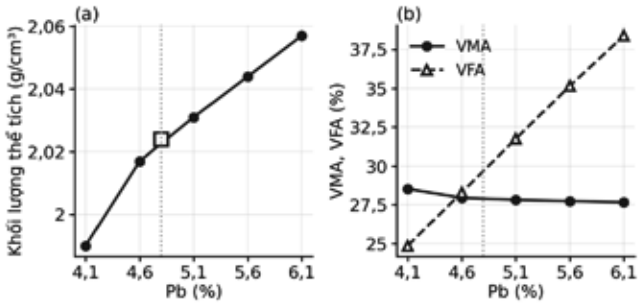
Độ rỗng dư giảm gần tuyến tính từ 21,45% xuống 17,05% (Hình 4b), mỗi bước tăng 0,5% nhựa làm Va giảm khoảng 0,93 ÷ 1,38%. Đối chiếu với yêu cầu 18 ÷ 22% [7], các mẫu từ 4,1% đến 5,1% đạt yêu cầu, mẫu 5,6% (Va = 17,98%) nằm sát giới hạn dưới và mẫu 6,1% không đạt. Như vậy, độ rỗng dư giới hạn hàm lượng nhựa không vượt quá khoảng 5,5%.

Độ tổn thất Cantabro phản ánh khả năng chống bong bật hạt, dạng hư hỏng đặc trưng của BTNR. Giá trị này giảm mạnh từ 16,11% xuống 3,46% khi hàm lượng nhựa tăng từ 4,1% đến 5,6%, rồi giảm chậm lại (2,34% tại 6,1%) (Hình 4c), cho thấy khi màng nhựa đã đủ dày, việc tăng thêm nhựa không còn cải thiện đáng kể khả năng chống bong bật. Tất cả các mẫu đạt yêu cầu ≤ 20% [7], song chỉ tiêu này định hướng giới hạn dưới của hàm lượng nhựa.

Độ chảy nhựa tăng phi tuyến rõ rệt (Hình 4d): rất nhỏ tại 4,1% và 4,6% (0,05% và 0,35%), tăng đột biến lên 2,43% tại 5,1% (gấp khoảng 6,9 lần) và đạt 10,29% tại 6,1%. Như vậy tồn tại ngưỡng hàm lượng nhựa trong khoảng 4,6 ÷ 5,1%, vượt qua ngưỡng này lượng nhựa tự do vượt quá khả năng giữ nhựa của khung cốt liệu hở, gây nguy cơ chảy nhựa, phân tầng và bít tắc lỗ rỗng. Đây là chỉ tiêu khống chế giới hạn trên chặt chẽ hơn độ rỗng dư.

Bảng 2. Các đặc trưng thể tích của hỗn hợp BTNR ở các hàm lượng nhựa khác nhau

Pb *(%)*	**G_{mm}**	**G_{mb}**	**G_{se}**	**P_{ba}** *(%)*	**P_{be}** *(%)*	**VMA** *(%)*	**VFA** *(%)*
4,1	2,541	1,996	2,709	0,43	3,69	28,52	24,85
4,6	2,530	2,023	2,718	0,57	4,06	27,96	28,29
5,1	2,515	2,037	2,723	0,64	4,50	27,83	31,73
5,6	2,500	2,050	2,728	0,70	4,94	27,75	35,15
6,1	2,488	2,064	2,736	0,81	5,34	27,67	38,38



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa đến: *(a) khối lượng thể tích; (b) độ rỗng cốt liệu VMA và độ rỗng lấp đầy VFA*

Bảng 2 và Hình 5 cho thấy VMA gần như không đổi (27,67 ÷ 28,52%) trong toàn bộ phạm vi khảo sát, khẳng định cấu trúc rỗng được quyết định chủ yếu bởi khung cốt liệu thô. Khối lượng thể tích tăng từ 1,996 g/cm^3 lên 2,064 g/cm^3 (khoảng 3,4%) do nhựa lấp đầy một phần lỗ rỗng, trong khi VFA tăng gần tuyến tính từ 24,85% lên 38,38%, tức trên 60% thể tích rỗng giữa các hạt cốt liệu vẫn không bị nhựa lấp đầy. P_{be} tăng từ 3,69% lên 5,34%, phản ánh chiều dày màng nhựa tăng dần, phù hợp với xu hướng giảm độ tổn thất Cantabro và tăng độ chảy nhựa. Lưu ý rằng P_{ba} tính toán tăng từ 0,43% lên 0,81% do G_{se} tính từ G_{mm} tăng nhẹ, cho thấy các đại lượng này khá nhạy với sai số của thí nghiệm G_{mm}.

Tổng hợp lại, độ tổn thất Cantabro định hướng giới hạn dưới, còn độ chảy nhựa và độ rỗng dư khống chế giới hạn trên của hàm lượng nhựa; miền hàm lượng nhựa hợp lý nằm trong khoảng 4,6 ÷ 5,1%. Hàm lượng nhựa tối ưu được lựa chọn là 4,80% theo khối lượng hỗn hợp (5,04% theo khối lượng cốt liệu), bảo đảm cân bằng giữa khả năng chống bong bật và nguy cơ chảy nhựa, đồng thời cho Va dự kiến khoảng 19,6% (nội suy từ Bảng 1), gần giữa khoảng yêu cầu 18 ÷ 22%, tạo dự trữ cho sự suy giảm độ rỗng do xe chạy trong quá trình khai thác.

3.2. Các chỉ tiêu của hỗn hợp BTNR chế tạo với hàm lượng nhựa tối ưu

Bảng 3. Các chỉ tiêu của hỗn hợp BTNR tại hàm lượng nhựa tối ưu 4,80%

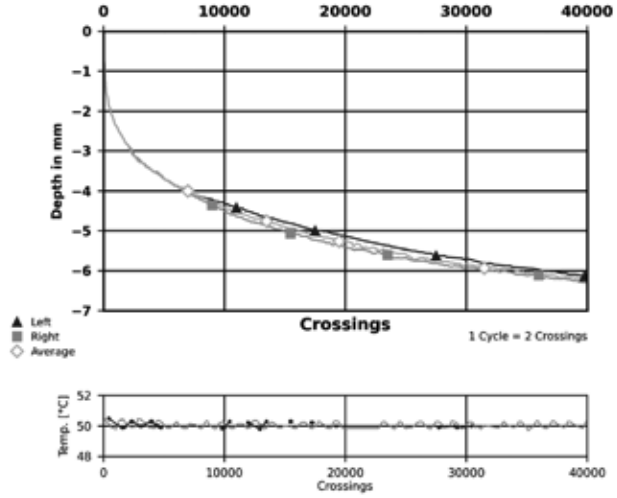
Chỉ tiêu kỹ thuật *Item*	**Đơn vị** *Unit*	**Kết quả** *Result*	**Yêu cầu [7]** *Spec.*	**Đánh giá** *Evaluation*
Độ ổn định Marshall (60°C, 40 phút)	kN	8,41	≥ 3,5	Đạt
Độ ổn định Marshall (60°C, 24 giờ)	kN	7,77	-	-
Độ ổn định còn lại	%	92,4	-	-
Độ rỗng dư	%	19,42	18 ÷ 22	Đạt
Độ rỗng liên thông	%	15,77	≥ 13	Đạt
Hệ số thấm trong phòng	cm/s	0,152	≥ 0,01	Đạt
Độ tổn thất Cantabro	%	8,12	≤ 20	Đạt
Độ chảy nhựa	%	0,777	-	-
Khối lượng thể tích	g/cm^3	2,024	-	-
G_{mm} / G_{se}	-	2,519 / 2,714	-	-
P_{ba} / P_{be}	%	0,50 / 4,30	-	-

Kết quả kiểm chứng tại OBC (Bảng 3) cho thấy tất cả các chỉ tiêu có yêu cầu đều đạt TCVN 13048:2024 [7]. Độ ổn định Marshall 8,41 kN, gấp khoảng 2,4 lần yêu cầu và xấp xỉ giá trị cực đại của dãy thiết kế. Sau 24 giờ ngâm ở 60°C, độ ổn định còn 7,77 kN, tương ứng độ ổn định còn lại 92,4%, cho thấy dính bám giữa nhựa polymer và cốt liệu bền vững trong môi trường nước. Độ rỗng dư 19,42% và độ rỗng liên thông 15,77%, tức khoảng 81% thể tích rỗng là lỗ rỗng liên thông; hệ số thấm 0,152 cm/s, lớn gấp khoảng 15 lần yêu cầu tối thiểu. Độ tổn thất Cantabro 8,12%, chỉ bằng khoảng 41% giới hạn cho phép.

So với giá trị nội suy từ Bảng 1, độ rỗng dư (19,63%) và khối lượng thể tích (2,023 g/cm^3) của mẫu kiểm chứng sai khác không quá 1,0%, chứng tỏ cấu trúc thể tích được tái lập tốt; độ ổn định, độ tổn thất Cantabro và độ chảy nhựa thuận lợi hơn giá trị nội suy do quan hệ giữa các chỉ tiêu và hàm lượng nhựa là phi tuyến. Tuy nhiên, độ chảy nhựa tại OBC (0,777%) cao gấp khoảng 2,2 lần so với mức 4,6% và OBC nằm gần vùng chảy nhựa tăng đột biến, do đó cần kiểm soát chặt chẽ sai số hàm lượng nhựa, nhiệt độ trộn và thời gian lưu chứa, vận chuyển hỗn hợp khi sản xuất.

3.3. Khả năng kháng hằn lún của hỗn hợp BTNR tại hàm lượng nhựa tối ưu

Kết quả thí nghiệm VHBX được trình bày trên Hình 6 và Bảng 4. Nhiệt độ nước được duy trì ổn định quanh 50°C trong suốt 40.000 lượt tác dụng với biên độ dao động nhỏ; đường cong của hai bánh xe gần như trùng nhau, chênh lệch độ sâu vệt hằn cuối cùng chỉ khoảng 0,2 mm, phản ánh tính đồng nhất của mẫu và điều kiện thí nghiệm.



Hình 6. Quan hệ giữa độ sâu vệt hằn và số lượt tác dụng (trên) và nhiệt độ nước (dưới) trong thí nghiệm VHBX của hỗn hợp BTNR tại OBC

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm VHBX trong nước ở 50°C của hỗn hợp BTNR tại OBC

Bánh xe *Wheel*	**Độ sâu vệt hằn tại 5.000 chu kỳ** *Rut depth*	**Độ sâu vệt hằn tại 10.000 chu kỳ** *Rut depth*	**Độ sâu vệt hằn tại 20.000 chu kỳ** *Rut depth*	**Tốc độ phát triển vệt hằn (10.000 ÷ 20.000 chu kỳ)** *Rutting rate*
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/1.000 chu kỳ)
Trái/ Left	4,3	5,1	6,1	0,09
Phải/ Right	4,5	5,4	6,3	0,09
Trung bình/ Mean	4,4	5,3	6,2	0,09

Ghi chú: Giá trị xác định từ đường cong độ sâu vệt hằn - số lượt tác dụng (Hình 6).

Đường cong phát triển vệt hằn thể hiện rõ hai giai đoạn. Trong giai đoạn đầu, độ lún tăng rất nhanh, đạt khoảng 3 mm sau khoảng 1.250 chu kỳ và 4,4 mm sau 5.000 chu kỳ, tức khoảng 70% độ sâu vệt hằn cuối cùng. Biến dạng này chủ yếu do cố kết bổ sung và tái sắp xếp các hạt cốt liệu thô trong khung cốt liệu hở có độ rỗng dư lớn, kết hợp với sự mềm hóa của nhựa ở 50°C. Sau đó, tốc độ phát triển vệt hằn giảm dần và gần như ổn định, chỉ khoảng 0,09 mm/1.000

chu kỳ trong khoảng 10.000 ÷ 20.000 chu kỳ; độ sâu vệt hằn trung bình sau 20.000 chu kỳ đạt 6,2 mm. Giá trị này chỉ bằng khoảng 50% giới hạn cho phép 12,5 mm sau 20.000 chu kỳ theo TCVN 13899:2023 [11], cho thấy hỗn hợp đạt yêu cầu về khả năng kháng hằn lún với mức dự trữ lớn.

Đáng chú ý, dù mẫu ngập trong nước ở nhiệt độ cao và nước lưu thông trực tiếp qua hệ thống lỗ rỗng liên thông, đường cong có dạng lõm đều với độ dốc giảm dần và không xuất hiện điểm bong tróc hay giai đoạn tăng tốc biến dạng trong suốt 20.000 chu kỳ. Điều này cho thấy hỗn hợp không bị phá hoại dính bám do nước, phù hợp với độ ổn định còn lại cao (92,4%) và độ tổn thất Cantabro thấp (8,12%) ở Mục 3.2. Khung cốt liệu thô có nhiều điểm tiếp xúc hạt hạt kết hợp với tính đàn hồi và khả năng dính bám của nhựa polymer là nguyên nhân chính giúp hỗn hợp duy trì khả năng kháng hằn lún tốt mặc dù có độ rỗng dư lớn. Mặt khác, biến dạng cố kết lớn trong giai đoạn đầu cho thấy BTNR sẽ tiếp tục bị đầm nén dưới tác dụng của xe chạy trong thời gian đầu khai thác; vì vậy, việc thiết kế Va ở mức 19,42%, cao hơn giới hạn dưới, cùng với kiểm soát tốt công tác lu lèn khi thi công là cần thiết để duy trì chức năng thoát nước lâu dài.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế hỗn hợp BTNR cỡ hạt danh định 12,5 mm sử dụng nhựa đường polymer PMB-S và vật liệu trong nước theo TCVN 13048:2024. Các kết luận chính như sau:

- Các chỉ tiêu biến đổi theo đúng quy luật của hỗn hợp cấp phối hở: độ ổn định Marshall đạt cực đại 8,69 kN tại 5,1% nhựa; độ rỗng dư giảm gần tuyến tính từ 21,44% xuống 17,04%; độ tổn thất Cantabro giảm từ 16,12% xuống 2,32%; độ chảy nhựa tăng đột biến khi hàm lượng nhựa vượt khoảng 4,6 ÷ 5,1%; VMA gần như không đổi, khẳng định vai trò quyết định của khung cốt liệu thô.
- Độ tổn thất Cantabro định hướng giới hạn dưới, còn độ chảy nhựa và độ rỗng dư khống chế giới hạn trên của hàm lượng nhựa. Hàm lượng nhựa tối ưu là 4,80% theo khối lượng hỗn hợp (5,04% theo khối lượng cốt liệu).
- Tại hàm lượng nhựa tối ưu, hỗn hợp đáp ứng đầy đủ yêu cầu của TCVN 13048:2024 với độ rỗng dư 19,42%, độ rỗng liên thông 15,77%, hệ số thấm 0,152 cm/s, độ ổn định Marshall 8,41 kN, độ ổn định còn lại 92,4% và độ tổn thất Cantabro 8,12%.
- Trong thí nghiệm VHBX ngập nước ở 50°C, độ sâu vệt hằn trung bình sau 20.000 chu kỳ là 6,2 mm, khoảng 70% phát sinh trong 5.000 chu kỳ đầu do cố kết; tốc độ phát triển vệt hằn ở giai đoạn ổn định chỉ khoảng 0,09 mm/1.000 chu kỳ và không xuất hiện điểm bong tróc.

Hỗn hợp thiết kế bảo đảm cân bằng giữa khả năng thoát nước, độ bền chống bong bật và khả năng kháng hằn lún, phù hợp cho lớp mặt đường thoát nước trong điều kiện Việt Nam. Do OBC nằm gần vùng độ chảy nhựa tăng nhanh và hỗn hợp có biến dạng cố kết ban đầu lớn, cần kiểm soát chặt chẽ hàm lượng nhựa, nhiệt độ hỗn hợp và công tác lu lèn khi thi công. Các nghiên cứu tiếp theo cần đánh giá khả năng duy trì độ rỗng, hệ số thấm theo thời gian khai thác và khả năng chống lão hóa của hỗn hợp.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này thuộc đề tài mã số T2025-234, được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP Hồ Chi Minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. National Cooperative Highway Research Program. Open-Graded Friction Courses for Highways. NCHRP Synthesis of Highway Practice 49, Transportation Research Board, Washington, D.C. 1978.

[2] Van der Zwan, J.Th., Goeman, Th., Gruis, H.J.A.J., Swart, J.H., Oldenburger, R.H. Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review. Transportation Research Record, no. 1265, pp. 95-110, 1990.

[3] Alvarez, A.E., Martin, A.E., Estakhri, C. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. Construction and Building Materials vol. 25, no. 3, pp. 1159-1166. 2011.

[4] Chen, J.-S., Yang, C.H. Porous asphalt concrete: A review of design, construction, performance and maintenance. International Journal of Pavement Research and Technology, vol. 13, pp. 601-612, 2020, doi: 10.1007/s42947-020-0039-7.

[5] Nguyen, H.T.T., Do, T.T., Phan, T.N., Nguyen, T.T.H. Laboratory investigation on mechanical properties of porous asphalt for being used in Vietnam. In: Proceedings of the 5th International Conference on Sustainability in Civil Engineering, vol. 1. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 733, pp. 42-51, Springer, Singapore, 2026, doi: 10.1007/978-981-95-1072-6_3.

[6] Đỗ Tiến Thọ, Nguyễn Huỳnh Tấn Tài. Thiết kế cấp phối và đánh giá tính năng kháng hằn lún của bê tông nhựa chặt C12.5. Tạp chí Xây dựng, số 01/2026, tr. 168-173, 2026.

[7] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13048:2024. Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa rỗng thoát nước - Thi công và nghiệm thu, 2024.

[8] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 8860-1:2011. Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 1: Xác định độ ổn định, độ dẻo Marshall, 2011.

[9] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 8860-4:2011. Bê tông nhựa - Phương pháp thử - Phần 4: Xác định tỷ trọng lớn nhất, khối lượng riêng của bê tông nhựa ở trạng thái rời 2011.

[10] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 11415:2016. Bê tông nhựa - Phương pháp xác định độ hao mòn Cantabro, 2016.

[11] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13899:2023. Hỗn hợp nhựa - Phương pháp thử vệt hằn bánh xe đã đầm nén, 2023.

■ Ngày nộp bài: 26/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 07/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2026

Đánh giá khả năng ứng dụng bê tông geopolymer tro bay sử dụng cát biển cho mặt đường lắp ghép trên đường giao thông nông thôn tại Việt Nam

Assessment of the applicability of sea-sand fly ash geopolymer concrete for precast rural road pavements in Vietnam

> TS TRẦN TRUNG HIẾU
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
Email: hieutrantrung@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá khả năng ứng dụng bê tông geopolymer tro bay sử dụng cát biển cho tấm mặt đường giao thông nông thôn trong điều kiện Việt Nam. Hai nguồn cát biển tại Hải Hòa (Thanh Hóa) và Nam Ô (Đà Nẵng) được rửa sạch, phơi/sấy khô và sử dụng làm cốt liệu mịn. Các hỗn hợp geopolymer sử dụng tro bay Phả Lại, dung dịch hoạt hóa NaOH - Na_2SiO_3 và được bảo dưỡng ở 60°C trong 24 giờ. Kết quả cho thấy ở tuổi 28 ngày, các hỗn hợp GPT30 và GPT35 đạt cường độ nén đặc trưng 30,87 - 36,45 MPa, cường độ kéo uốn 3,51 - 4,38 MPa, cường độ kéo ép chẻ 3,23 - 3,62 MPa và mô-đun đàn hồi 22,51 - 26,00 GPa. Hỗn hợp GPT35 đáp ứng tốt hơn yêu cầu chịu kéo uốn của vật liệu mặt đường. Trên cơ sở các đặc trưng cơ học và mô hình tấm hữu hạn trên nền đàn hồi, nghiên cứu đề xuất tấm chữ nhật (0,5×1,0)m với chiều dày 10 - 24 cm tùy cấp đường, lưu lượng xe và cấp phối bê tông. Kết quả cho thấy vật liệu có tiềm năng áp dụng cho đường giao thông nông thôn và đường cấp thấp tại khu vực ven biển, hải đảo. Tuy nhiên, trước khi áp dụng đại trà cần kiểm chứng thêm bằng thử nghiệm tấm nguyên kích thước, tải trọng lặp và độ bền trong môi trường biển.

Từ khóa: Bê tông geopolymer; tro bay; cát biển; mặt đường lắp ghép; đường giao thông nông thôn; vật liệu bền vững.

ABSTRACT

This study assesses the applicability of sea-sand fly ash geopolymer concrete to precast rural road pavement slabs under Vietnamese conditions. Washed sea sands collected from Hai Hoa (Thanh Hoa) and Nam O (Da Nang) were used as fine aggregates. The geopolymer mixtures incorporated Pha Lai fly ash and a NaOH - Na_2SiO_3 activator and were heat-cured at 60°C for 24h. At 28 days, the GPT30 and GPT35 mixtures achieved characteristic compressive strengths of 30.87 - 36.45 MPa, flexural strengths of 3.51 - 4.38 MPa, splitting tensile strengths of 3.23 - 3.62 MPa and elastic moduli of 22.51 - 26.00 GPa. GPT35 provided the more suitable flexural performance for pavement applications. Based on the measured mechanical properties and a finite-slab-on-elastic-foundation approach, rectangular slabs measuring (0.5×1.0)m and 10 - 24 cm in thickness are proposed for different road classes and traffic levels. The results demonstrate the potential of this material for rural and low-volume roads in coastal and island areas. Full-scale slab tests, repeated loading and marine durability assessments are nevertheless required before widespread implementation.

Keywords: Geopolymer concrete; fly ash; sea sand; precast pavement; rural roads; sustainable materials.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhu cầu cát làm cốt liệu cho bê tông và xây dựng hạ tầng giao thông tại Việt Nam ngày càng tăng, trong khi nguồn cát sông có xu hướng khan hiếm và việc khai thác quá mức gây nhiều tác động bất lợi đến lòng dẫn và môi trường. Tại các khu vực ven biển và hải đảo, chi phí vận chuyển vật liệu từ đất liền còn làm tăng đáng kể giá

thành xây dựng. Vì vậy, khai thác hợp lý nguồn cát biển địa phương kết hợp sử dụng tro bay là một hướng tiếp cận có ý nghĩa về tài nguyên và môi trường.

Bê tông geopolymer tro bay sử dụng chất kết dính aluminosilicat hoạt hóa kiềm thay cho xi măng Portland. Nhiều nghiên cứu cho thấy loại vật liệu này có thể đạt cường độ cao, phát triển cường độ sớm tốt khi bảo dưỡng nhiệt và có tiềm năng kháng một số tác nhân xâm thực [1-4]. Tuy nhiên, cát biển có thành phần hạt, hàm lượng muối và tạp chất thay đổi theo vị trí khai thác, do đó khả năng sử dụng cần được đánh giá bằng nguồn vật liệu cụ thể.

Bảo dưỡng nhiệt tạo thuận lợi cho quá trình geopolymer hóa nhưng làm hạn chế khả năng thi công đổ tại chỗ. Công nghệ đúc sẵn giải quyết được "điểm nghẽn" này vì hỗn hợp có thể được định lượng, tạo hình và bảo dưỡng trong điều kiện kiểm soát trước khi vận chuyển đến công trường. Đối với đường lưu lượng thấp, tấm lắp ghép còn có ưu điểm thi công nhanh, giảm công việc ướt tại hiện trường và dễ thay thế cục bộ khi hư hỏng.

Mục tiêu của nghiên cứu là: (i) Đánh giá các đặc trưng cơ học của bê tông geopolymer tro bay sử dụng hai nguồn cát biển Việt Nam; (ii) xác định phạm vi cấp phối phù hợp cho vật liệu mặt đường và (iii) đề xuất sơ bộ chiều dày tấm mặt đường lắp ghép cho đường cấp thấp và đường giao thông nông thôn. Phạm vi nghiên cứu giới hạn ở thí nghiệm vật liệu trong phòng và tính toán kết cấu; chưa bao gồm thử tải tấm nguyên kích thước và quan trắc đoạn đường thử nghiệm.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

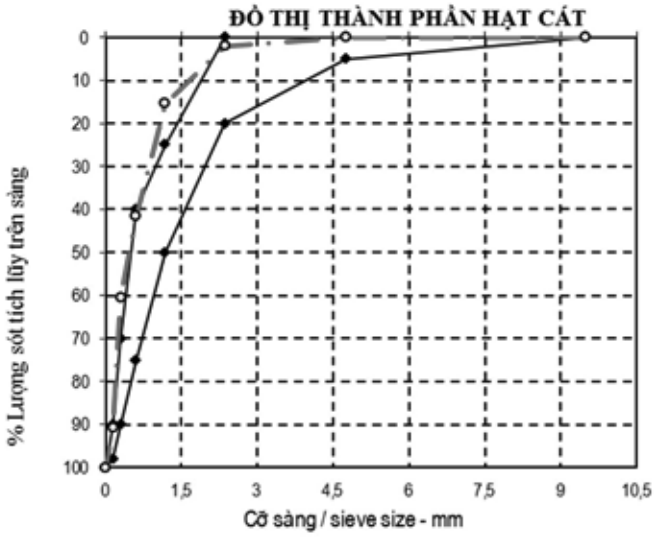
2.1. Vật liệu chế tạo

Chất kết dính sử dụng tro bay Phả Lại. Dung dịch hoạt hóa gồm NaOH và Na_2SiO_3 với tỷ lệ khối lượng Na_2SiO_3/NaOH bằng 2,5. Cốt liệu thô là đá dăm Phủ Lý có cỡ hạt lớn nhất danh định 12,5 mm, khối lượng riêng 2,717 g/cm^3, độ hút nước 0,76% và độ mài mòn Los Angeles 22,36%.

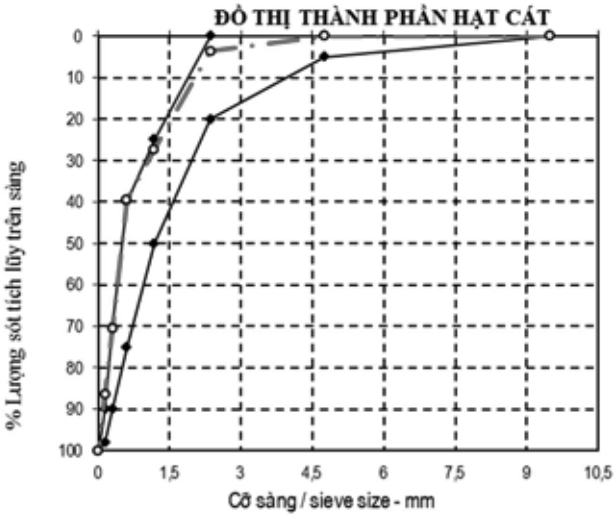
Cốt liệu mịn gồm cát biển lấy tại Hải Hòa - Thanh Hóa (ký hiệu TH) và Nam Ô - Đà Nẵng (ký hiệu ĐN). Cát được rửa bằng nước sạch, phơi/sấy khô trước khi phối trộn. Một số đặc trưng chính được trình bày ở Bảng 1. Hàm lượng muối của cả hai nguồn sau xử lý đều ở mức thấp. Tuy nhiên, sự khác nhau về cấp phối hạt có thể ảnh hưởng đến độ đặc chắc và tính chất cơ học của hỗn hợp.

Bảng 1. Một số đặc trưng của cát biển sử dụng trong nghiên cứu

Chỉ tiêu	Đơn vị	Hải Hòa - Thanh Hóa	Nam Ô - Đà Nẵng
Khối lượng riêng	g/cm^3	2,48	2,57
Khối lượng thể tích xốp	g/cm^3	1,30	1,37
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	1,15	0,92
Mô đun độ lớn	-	2,10	2,20
Hàm lượng mica	%	0,55	0,43
Hàm lượng muối	%	0,010	0,008



a) - Cát biển Hải Hòa - Thanh Hóa



b) - Cát biển Nam Ô - Đà Nẵng

Hình 1. Biểu đồ thành phần hạt của hai nguồn cát biển

2.2. Thành phần hỗn hợp và chế tạo mẫu

Các cấp phối được thiết kế theo phương pháp thể tích - khối lượng tham khảo từ Hardjito và Rangan [2, 3]. Tổng lượng cốt liệu chiếm 77% khối lượng bê tông; cát chiếm 30% tổng lượng cốt liệu. Ba cấp phối mục tiêu 30, 35 và 40 MPa được xây dựng bằng cách thay đổi tỷ lệ dung dịch hoạt hóa/tro bay (AAS/FA) và tỷ lệ nước/chất kết dính. Thành phần cho 1 m^3 bê tông được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông geopolymer tro bay (GPT)

Cấp phối	Đá (kg)	Cát (kg)	Tro bay (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	NaOH (kg)	Nước (kg)	AAS/FA
GPT30	1293,6	554,4	380,69	122,36	48,95	121,44	0,45
GPT35	1293,6	554,4	394,29	112,65	45,06	110,40	0,40
GPT40	1293,6	554,4	408,89	102,22	40,89	99,36	0,35

Tro bay và cốt liệu được trộn khô khoảng 3 phút trong máy trộn cưỡng bức. Dung dịch hoạt hóa và nước được bổ sung, sau đó trộn tiếp 4 phút. Mẫu được đầm kết hợp chọc và rung, phủ kín để hạn chế mất nước, bảo dưỡng ở 60°C trong 24 giờ, để nguội khoảng 6 giờ trước khi tháo khuôn và tiếp tục lưu trong phòng thí nghiệm.

2.3. Chương trình thí nghiệm

Cường độ nén được xác định trên mẫu trụ (150×300)mm theo ASTM C39 [7] tại 7, 14 và 28 ngày; cường độ kéo uốn trên dầm (150×150×600)mm theo ASTM C78 [8]; cường độ kéo ép chẻ theo ASTM C496 [9]; mô-đun đàn hồi tĩnh theo ASTM C469 [10]. Mỗi tổ gồm 6 mẫu. Giá trị đặc trưng được quy ước theo biểu thức $R_{đt} = R_{tb} - 1,645s$, trong đó R_{tb} là giá trị trung bình và s là độ lệch chuẩn của tổ mẫu. Do số mẫu của mỗi tổ còn hạn chế, giá trị này được sử dụng để so sánh nội bộ giữa các cấp phối, không thay thế cho đánh giá thống kê trên quy mô sản xuất.

Cả ba cấp phối GPT30, GPT35 và GPT40 được thử cường độ nén ở tuổi 28 ngày. Các chỉ tiêu kéo uốn, kéo ép chẻ và mô-đun đàn hồi được phân tích cho GPT30 và GPT35 theo bộ số liệu thí nghiệm hiện có. Vì vậy, các kết luận về khả năng làm mặt đường tập trung vào hai cấp phối này.

2.4. Phương pháp đánh giá tấm mặt đường lắp ghép

Tấm được mô hình hóa như tấm hữu hạn đặt trên nền đàn hồi. Chỉ số độ mềm S phụ thuộc mô đun đàn hồi của bê tông, mô-đun đàn hồi chung trên mặt móng, hệ số Poisson, chiều dày và kích thước tấm. Mô-men uốn tổng cộng được xét từ tải trọng bánh xe và ảnh hưởng truyền lực giữa các tấm. Chiều dày được xác định theo điều kiện ứng suất kéo uốn cho phép, có xét hệ số chiết giảm cường độ. Cách tiếp cận tính toán kế thừa phương pháp TCCS 39:2022 [12] đã sử dụng trong đề tài [13]; khi triển khai dự án thực tế cần kiểm tra lại theo hệ thống tiêu chuẩn và tải trọng thiết kế hiện hành.

Phương án khảo sát sử dụng tấm chữ nhật không cốt thép kích thước (0,5×1,0)m trên lớp móng cấp phối đá dăm hoặc cấp phối thiên nhiên dày 10 - 18 cm. Việc lựa chọn tấm không cốt thép nhằm giảm nguy cơ ăn mòn cốt thép trong môi trường biển; giải pháp liên kết và truyền lực tại khe cần được thiết kế riêng cho công trình cụ thể.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

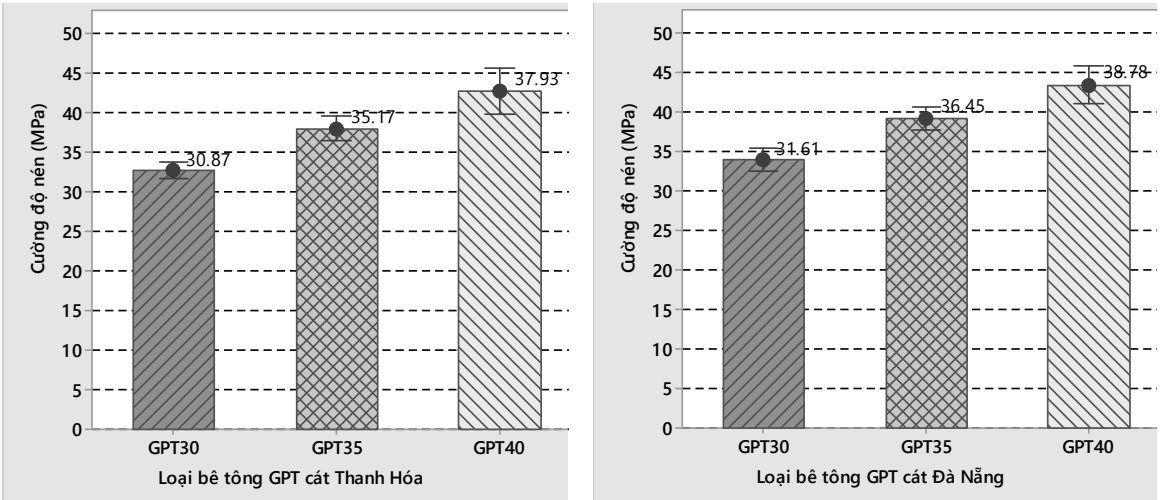
3.1. Cường độ nén và sự phát triển cường độ

Ở tuổi 28 ngày, cường độ nén đặc trưng của GPT30 và GPT35 đạt lần lượt 30,87 - 31,61 MPa và 35,17 - 36,45 MPa. Cát Nam Ô cho kết quả cao hơn cát Hải Hòa từ khoảng 2,4% đến 3,6% đối với hai cấp phối này. Mức chênh lệch không lớn, nhưng nhất quán với mô-đun độ lớn cao hơn và hàm lượng bụi, bùn, sét thấp hơn của cát Nam Ô.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông ở 28 ngày

TT	Cường độ nén	Cát Thanh Hóa			Cát Đà Nẵng		
		GPT30	GPT35	GPT40	GPT30	GPT35	GPT40
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	33,41	35,76	38,91	34,20	40,70	44,17
		33,42	40,02	44,37	31,91	39,40	44,36
		32,67	39,32	40,45	34,61	40,05	42,61
		30,79	37,86	42,00	32,80	39,48	43,55
		32,72	37,61	44,66	34,98	36,50	39,57
		33,63	37,56	46,12	35,48	39,43	46,59
2	Trung bình R_{tb}, MPa	32,77	38,02	42,75	34,00	39,26	43,47
3	Độ lệch chuẩn σ, MPa	1,16	1,74	2,94	1,46	1,71	2,86
4	Giá trị đặc trưng, MPa	30,87	35,17	37,93	31,61	36,45	38,78
5	Cường độ thiết kế, MPa	30,00	35,00	40,00	30,00	35,00	40,00
6	Tỷ số giá trị đặc trưng/cường độ thiết kế	1,03	1,00	0,95	1,05	1,04	0,97

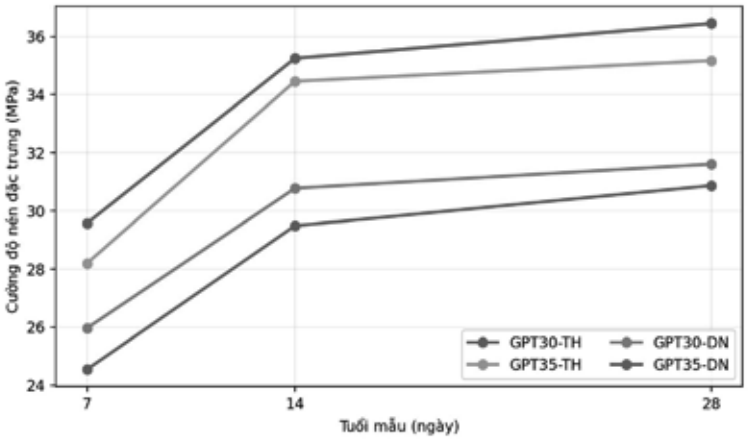
Kết quả cường độ nén trung bình và độ phân tán của các tổ mẫu ở tuổi 28 ngày được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Kết quả thí nghiệm cường độ nén bê tông geopolymer tro bay ở 28 ngày

Các cấp phối GPT30 và GPT35 đều đạt hoặc vượt cường độ thiết kế. Ngược lại, GPT40 chỉ đạt 37,93 MPa với cát Thanh Hóa và 38,78 MPa với cát Đà Nẵng, tương ứng 95% và 97% giá trị thiết kế. Kết quả cho thấy việc giảm AAS/FA và lượng nước để hướng tới cường độ 40 MPa không tạo ra mức tăng cường độ tương ứng, có thể do tính công tác và khả năng đầm chặt suy giảm. Do đó, phạm vi không lớn hơn 35 MPa là lựa chọn thận trọng cho hệ vật liệu và chế độ chế tạo đang xét.

Mức cường độ thu được tương đương hoặc cao hơn kết quả khoảng 25 MPa của Shinde và Kadam [5] và phạm vi 31,88 - 35,19 MPa trong nghiên cứu tại Việt Nam [14]. Nghiên cứu của Lyu và cộng sự [6] đạt cường độ cao hơn khi sử dụng hệ chất kết dính và điều kiện cấp phối khác, điều này cho thấy không thể tách ảnh hưởng của cát biển khỏi loại tiền chất, chất hoạt hóa và chế độ bảo dưỡng khi so sánh giữa các công bố.



Hình 3. Sự phát triển cường độ nén đặc trưng của các cấp phối GPT30 và GPT35

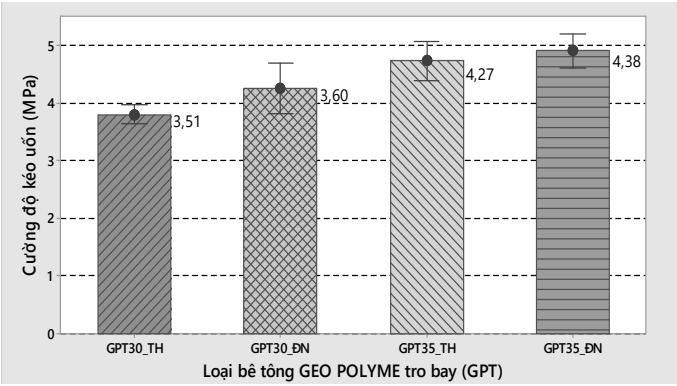
Sau bảo dưỡng nhiệt, cường độ phát triển nhanh: Tại 7 ngày đạt trung bình 80,75% và tại 14 ngày đạt 96,89% cường độ 28 ngày. Đặc điểm này phù hợp với sản xuất đúc sẵn vì cho phép rút ngắn chu kỳ khuôn và thời gian lưu kho. Tuy vậy, cường độ sớm không đồng nghĩa với khả năng chịu tải khai thác sớm của toàn bộ kết cấu; chất lượng khe nối và lớp tiếp xúc tấm - móng vẫn là các yếu tố chi phối.

3.2. Cường độ kéo và mô-đun đàn hồi

Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn và mô-đun đàn hồi ở 28 ngày của các tổ hợp mẫu bê tông thu được như sau:

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn ở 28 ngày

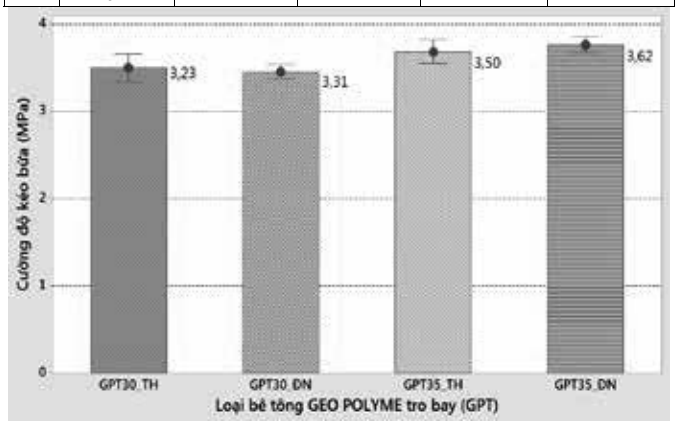
TT	Cường độ	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30_TH	GPT35_TH	GPT30_ĐN	GPT35_ĐN
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	3,90	5,12	3,91	4,47
		3,89	5,13	4,07	4,81
		3,54	4,50	4,72	4,97
		3,79	4,80	4,55	5,13
		3,75	4,49	3,73	5,26
		3,99	4,42	4,61	4,83
2	Trung bình R_{tb}, MPa	3,81	4,74	4,26	4,91
3	Độ lệch chuẩn σ, MPa	0,18	0,29	0,40	0,32
4	Giá trị đặc trưng, MPa	3,51	4,27	3,60	4,38



Hình 4. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo uốn bê tông geopolymer tro bay ở 28 ngày

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi bửa ở 28 ngày

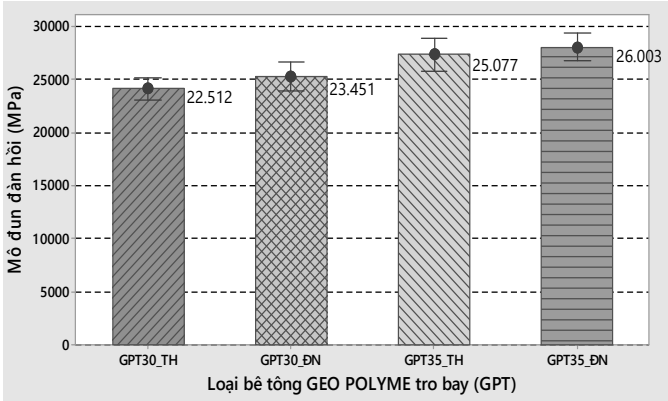
TT	Cường độ	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30_TH	GPT35_TH	GPT30_ĐN	GPT35_ĐN
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	3,55	3,83	3,49	3,68
		3,68	3,83	3,39	3,68
		3,27	3,60	3,49	3,87
		3,59	3,71	3,38	3,74
		3,53	3,55	3,39	3,72
		3,37	3,57	3,58	3,89
2	Trung bình R_{tb}, MPa	3,50	3,68	3,45	3,76
3	Độ lệch chuẩn σ, MPa	0,17	0,11	0,08	0,09
4	Giá trị đặc trưng, MPa	3,23	3,50	3,31	3,62



Hình 5. Kết quả thí nghiệm cường độ kéo khi bửa bê tông GPT ở 28 ngày

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm mô-đun đàn hồi ở 28 ngày

TT	Mô-đun đàn hồi	Cát Thanh Hóa		Cát Đà Nẵng	
		GPT30	GPT35	GPT30	GPT35
1	Kết quả thí nghiệm, MPa	23.283	27.711	26.812	26.953
		23.671	29.333	26.831	29.280
		25.289	26.853	24.464	29.494
		24.885	25.897	25.593	27.822
		22.825	25.866	24.043	28.534
		25.017	28.732	24.164	26.393
2	Trung bình R_{tb}, MPa	24.162	27.399	25.318	28.079
3	Độ lệch chuẩn σ, MPa	1.006	1.415	1.138	1.266
4	Giá trị đặc trưng, MPa	22.512	25.077	23.451	26.003



Hình 6. Kết quả thí nghiệm mô-đun đàn hồi

Bảng 7. Tổng hợp các tính chất cơ học đặc trưng ở tuổi 28 ngày

Cấp phối	Cát	Nén (MPa)	Kéo uốn (MPa)	Ép chẻ (MPa)	Mô-đun (GPa)
GPT30	Thanh Hóa	30,87	3,51	3,23	22,51
GPT35	Thanh Hóa	35,17	4,27	3,50	25,08
GPT30	Đà Nẵng	31,61	3,60	3,31	23,45
GPT35	Đà Nẵng	36,45	4,38	3,62	26,00

Mặt đường cứng chủ yếu được kiểm soát bởi ứng suất kéo uốn. GPT35 đạt cường độ kéo uốn 4,27 - 4,38 MPa, cao hơn GPT30 (3,51 - 3,60 MPa), vì vậy có lợi thế hơn khi sử dụng cho tấm chịu tải trọng xe. Tỷ số kéo uốn/nén ở 28 ngày nằm trong khoảng 0,114 - 0,121. Từ bộ số liệu, quan hệ thực nghiệm được đề tài xác lập dưới dạng Rku = 0,68(Rn)1/2 với hệ số xác định hiệu chỉnh R^2 = 0,750. Quan hệ này chỉ nên sử dụng trong miền vật liệu và cường độ đã khảo sát.

Mô-đun đàn hồi tăng từ 22,51 - 23,45 GPa đối với GPT30 lên 25,08 - 26,00 GPa đối với GPT35. Giá trị này thấp hơn hoặc tương đương phần dưới của phạm vi thường gặp ở bê tông xi măng cùng cấp cường độ, làm thay đổi độ cứng tương đối tấm - móng và cần được đưa trực tiếp vào tính toán thay vì suy ra từ công thức cho bê tông xi măng Portland.

3.3. Khả năng đáp ứng cho vật liệu mặt đường

Xét theo số liệu của đề tài [13], toàn bộ GPT30 và GPT35 có cường độ nén lớn hơn 30 MPa. Khi tham chiếu ngưỡng cường độ kéo uốn 4,0 MPa đối với mặt đường cấp VI theo TCCS 39:2022 [12], chỉ GPT35 đáp ứng. Đối với đường giao thông nông thôn, các hỗn hợp GPT30 và GPT35 đều có thể được xem xét trên cơ sở yêu cầu cường độ tương ứng của TCVN 10380:2014 [11], nhưng chiều dày tấm vẫn phải được kiểm toán theo tải trọng và điều kiện nền - móng cụ thể. GPT30 thích hợp hơn với đường lưu lượng thấp, sân bãi, vỉa hè; GPT35 được ưu tiên cho tuyến có xe ô tô và yêu cầu chịu uốn cao hơn.

Khả năng chống mài mòn không thể được kết luận chỉ từ cường độ nén. Mặc dù cường độ nén trên 30 MPa là một chỉ dấu thuận lợi, nghiên cứu chưa có kết quả thử mài mòn bề mặt, độ nhám, co ngót và mỏi, do đó các chỉ tiêu này cần được kiểm chứng trước khi áp dụng thực tế.

3.4. Phương án chiều dày tấm lắp ghép

Bảng 8. Chiều dày tấm (0,5×1,0)m đề xuất từ kết quả tính toán của đề tài [13]

Loại đường và lớp móng	Lưu lượng thiết kế	GPT30 (cm)	GPT35 (cm)
Đường cấp VI; móng 18 cm	≥ 200 xe quy đổi/ngày đêm	22 - 24	20 - 22
GTNT cấp A; móng 15 cm	100 - 200 xe quy đổi/ngày đêm	19 - 20	18 - 19
GTNT cấp B; móng 12 cm	50 - 100 xe quy đổi/ngày đêm	17 - 18	16 - 17
GTNT cấp C; móng 10 cm	≤ 50 xe quy đổi/ngày đêm	15 - 16	14 - 15
GTNT cấp D; móng 10 cm	Không có ô tô	12 – 14	10 – 12

Chiều dày giảm dần theo cấp đường và lưu lượng xe; với cùng điều kiện nền móng, GPT35 cho phép giảm khoảng 1 - 2 cm so với GPT30 nhờ cường độ kéo uốn và mô-đun đàn hồi cao hơn. Tuy nhiên, các giá trị trong Bảng 8 là phương án sơ bộ, không phải cấu tạo định hình áp dụng trực tiếp. Khi thiết kế cần cập nhật tải trọng trục, phổ tải, độ tin cậy, mô-đun nền theo mùa, gradient nhiệt, điều kiện thoát nước và hiệu quả truyền lực qua khe.

Kích thước (0,5×1,0)m tạo thuận lợi cho vận chuyển và thay thế tấm, đồng thời giảm mô-men uốn so với tấm lớn. Đổi lại, số lượng khe tăng, kéo theo rủi ro nước thâm nhập, chênh cao và giảm độ êm thuận. Vì vậy, chất lượng lớp tạo phẳng, độ đồng đều của móng, vật liệu chèn khe và giải pháp hạn chế chuyển vị tương đối giữa các tấm phải được xem là một bộ phận của hệ kết cấu.

3.5. Đề xuất dây chuyền chế tạo và lắp đặt

Dây chuyền đề xuất gồm: Kiểm soát và xử lý cát biển; định lượng cốt liệu - tro bay - dung dịch hoạt hóa; trộn cưỡng bức; tạo hình và đầm; phủ kín; bảo dưỡng nhiệt 60 - 80°C trong khoảng 24 giờ; làm nguội có kiểm soát; tháo khuôn; kiểm tra chất lượng; lưu kho, vận chuyển và lắp đặt. Dung dịch NaOH cần được chuẩn bị trước, có quy trình an toàn hóa chất và kiểm soát nồng độ.

Tại hiện trường, lớp móng phải đạt độ chặt, cao độ và độ bằng phẳng thiết kế. Tấm được hạ theo đúng vị trí, kiểm tra tiếp xúc đáy tấm móng, hiệu chỉnh cục bộ lớp tạo phẳng và hoàn thiện khe nối. Nên tổ chức nghiệm thu theo lô sản xuất, bao gồm kích thước hình học, ngoại quan, cường độ, sai số cao độ sau lắp đặt và độ bằng phẳng dọc/ngang.

3.6. Lợi ích và hướng nghiên cứu tiếp theo

Giải pháp đồng thời tận dụng tro bay và một phần nguồn cát biển sẵn có tại địa phương, giảm phụ thuộc vào cát sông và giảm khối lượng công việc bê tông tại hiện trường. Sản xuất đúc sẵn phù hợp với yêu cầu bảo dưỡng nhiệt, kiểm soát tốt hơn chất lượng và cho phép thi công nhanh tại những khu vực có thời gian tiếp cận hạn chế.

Các hạn chế chính gồm việc sử dụng dung dịch kiềm có tính ăn mòn, quá trình bảo dưỡng nhiệt, biến động chất lượng cát biển, yêu cầu thiết bị nâng tấm bê tông và vấn đề khe nối. Nghiên cứu hiện tại chưa định lượng độ bền clorua, sunfat, chu kỳ khô - ướt, mài mòn, co ngót và mỏi. Mặc dù cát đã rửa có hàm lượng muối thấp, nhưng chưa đủ cơ sở để suy rộng về tuổi thọ trong môi trường biển.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

- Bê tông geopolymer tro bay sử dụng cát biển đã rửa tại Hải Hòa và Nam Ô có thể đạt cấp cường độ phù hợp với cấu kiện mặt đường đúc sẵn. GPT30 và GPT35 đạt cường độ nén đặc trưng 30,87 - 36,45 MPa ở 28 ngày; GPT40 không đạt đầy đủ mức cường độ thiết kế 40 MPa.

- Mẫu bê tông GPT35 có cường độ kéo uốn 4,27 - 4,38 MPa và mô-đun đàn hồi 25,08 - 26,00 GPa, là cấp phối phù hợp hơn cho tấm mặt đường có xe ô tô. Cường độ ở 7 và 14 ngày lần lượt đạt khoảng 80,75% và 96,89% cường độ 28 ngày, thuận lợi cho sản xuất đúc sẵn.

- Với tấm chữ nhật (0,5×1,0)m, chiều dày sơ bộ được đề xuất từ 20 - 24 cm cho đường cấp VI và từ 10 - 20 cm cho các cấp đường giao thông nông thôn, tùy cấp phối, lưu lượng xe và chiều dày lớp móng.

- Phạm vi áp dụng phù hợp trước mắt là đường giao thông nông thôn, đường nội bộ, sân bãi và các tuyến lưu lượng thấp tại khu vực ven biển, hải đảo. Các giá trị chiều dày phải được kiểm toán lại theo số liệu nền - móng, tải trọng và tiêu chuẩn hiện hành của từng dự án.

- Trước khi áp dụng đại trà, cần thử tải tấm nguyên kích thước và đoạn đường thử; đánh giá tải trọng lặp, truyền lực qua khe, mài mòn, co ngót, kháng clorua - sunfat và chu kỳ khô - ướt, đồng thời thực hiện phân tích chi phí và vòng đời môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. Davidovits. Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2008.

[2] D. Hardjito, B.V. Rangan. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC1, Curtin University of Technology, Perth, 2005.

[3] B.V. Rangan. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC4, Curtin University of Technology, Perth, 2008.

[4] S.E. Wallah, B.V. Rangan, Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. Research Report GC2, Curtin University of Technology, Perth, 2006.

[5] B.H. Shinde, K.N. Kadam. Strength properties of fly ash based geopolymer concrete with sea sand. American Journal of Engineering Research, 5(7), 129-132, 2016.

[6] X. Lyu, N. Robinson, M. Elchalakani, M.L. Johns, M. Dong, S. Nie. Sea sand seawater geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 50, 104141, 2022, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104141.

[7] ASTM C39/C39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.

[8] ASTM C78/C78M. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International.

[9] ASTM C496/C496M-17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.

[10] ASTM C469/C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International.

[11] Bộ Giao thông vận tải. TCVN 10380:2014. Đường giao thông nông thôn - Yêu cầu thiết kế.

[12] Tổng cục Đường bộ Việt Nam. TCCS 39:2022/TCĐBVN. Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông, 2022.

[13] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo tổng hợp đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ "Nghiên cứu chế tạo bê tông polyme vô cơ sử dụng cát biển và công nghệ thi công trong xây dựng đường giao thông ở khu vực ven biển và hải đảo", 2018.

[14] Trần Thị Thanh Triết. Nghiên cứu các đặc tính cơ học của bê tông geopolymer sử dụng cát biển. Luận văn Thạc sĩ. Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP Hồ Chí Minh, 2016.

■ Ngày nộp bài: 10/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 21/8/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 16/9/2026

Ảnh hưởng của nhũ tương nhựa đường đến độ hấp thụ nước, độ thấm ion clo, hiệu quả kinh tế và tác động môi trường của bê tông xi măng - xỉ lò cao dùng cho mặt đường ô tô

Effects of asphalt emulsion on water absorption, chloride ion permeability, economic efficiency and environmental impact of blast furnace slag-cement concrete for pavements

> PGS.TS HỒ VĂN QUÂN[1,*], THS PHẠM THÁI UYẾT[2], KS NGUYỄN TRƯỜNG THỊNH[3]
[1]Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng
[2]Trung tâm Kỹ thuật và Công nghệ Đường bộ phía Nam - Cục Đường bộ Việt Nam
[3]Ban Quản lý dự án Đầu tư xây dựng các công trình giao thông và nông nghiệp Đà Nẵng
[*]Email: hvquan@ute.udn.vn

TÓM TẮT

Bài báo đánh giá ảnh hưởng của (4 - 16)% nhũ tương nhựa đường (EA) đến độ hấp thụ nước mao dẫn (WA), độ thấp ion clo (CIP), phân tích hiệu quả kinh tế và đánh giá tác động môi trường của bê tông xi măng (BTXM) chứa 35% xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS). Kết quả nghiên cứu cho thấy EA làm giảm đáng kể WA và WA giảm trung bình khoảng 32,0% đối với các bê tông chứa 8% và 12% EA, nhưng EA có xu hướng làm gia tăng CIP khi thí nghiệm bằng phương pháp điện lượng, tuy nhiên ứng xử của các bê tông chứa EA đối với WA và CIP là đồng nhất với nhau. Giá thành vật liệu của các bê tông chứa EA có xu hướng gia tăng và tăng lên đáng kể khi sử dụng hàm lượng EA trên 8%. Ngược lại, lượng phát thải CO_2 và mức tiêu hao năng lượng của các bê tông chứa (4 - 16)% EA và 35% GGBS giảm trung bình khoảng 28%.

Từ khóa: Nhũ tương nhựa đường; độ hấp thụ nước; độ thấm ion clo; tác động môi trường.

ABSTRACT

The paper evaluates the effects of (4 - 16)% asphalt emulsion (EA) on capillary water absorption (WA), chloride ion permeability (CIP), economic efficiency analysis and environmental impact assessment of cement concrete containing 35% ground granulated blast-furnace slag (GGBS). The research results show that EA significantly reduces WA and WA decreases by an average of about 32.0% for concretes containing 8% and 12% EA, but EA tends to increase CIP when tested by the coulometric method; however, the behaviors of EA-containing concretes towards WA and CIP are consistent with each other. The material cost of EA-containing concretes tends to increase and rises significantly when using an EA content above 8%. Conversely, the CO_2 emissions and energy consumption of concretes containing (4 - 16)% EA and 35% GGBS decrease by an average of about 28%.

Keywords: Emulsified asphalt; water absorption; chloride ion penetration; environmental impact.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đối với mặt đường BTXM, cường độ kéo uốn là chỉ tiêu quan trọng nhất để tính toán và thiết kế lựa chọn kích thước hình học của tấm BTXM. Để cải thiện cường độ chịu kéo uốn của tấm BTXM cũng như giảm thiểu tác động đến môi trường, hầu hết các nghiên cứu sử dụng các phụ gia khoáng như tro bay, xỉ lò cao… để thay thế một phần xi măng hoặc cát sông [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Thời gian gần đây đã có một số nghiên cứu đề xuất sử dụng nhũ tương nhựa đường làm phụ gia cho bê tông nhằm cải thiện cường độ chịu kéo uốn, sức kháng rung chấn và ứng dụng cho mặt đường ô tô cũng như cho đường sắt [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Nghiên cứu gần đây của nhóm tác giả H.V. Quân và cộng sự (cs) [9] đã đánh giá ảnh hưởng của nhũ tương nhựa đường polyme (NT) đến tính chất cơ học của bê tông gồm cường độ nén, cường độ uốn và vận tốc xung siêu âm sử dụng (4 - 16)% NT theo khối lượng xi măng. Từ kết quả nghiên cứu, các tác giả kết luận rằng sử dụng 8% NT trong bê tông là tối ưu [9]. Tuy nhiên, đối với mặt đường BTXM, ngoài các yêu cầu về tính chất cơ học nhằm đảm bảo bê tông đủ cường độ để đáp

ứng khả năng chịu tải trọng của các phương tiện giao thông, các yêu cầu về độ bền như khả năng chống thấm nước, chống xâm nhập của các chất có hại như các ion clo, ion sufat… từ các môi trường xâm thực cũng quan trọng không kém nhằm hạn chế sự ăn mòn và kéo dài tuổi thọ của công trình. H. Zhang và cs [13] nghiên cứu các tính chất độ bền của bê tông tự đầm (SCC) sử dụng (0 - 20)% NT theo khối lượng xi măng, kết quả nghiên cứu cho thấy NT cải thiện đáng kể khả năng chống thấm ion clo, độ bền đông - tan băng và độ bền khi ngâm trong dung dịch sunfat, tuy nhiên, việc dùng quá nhiều NT dẫn đến nhiều lỗ rỗng hơn trong SCC do hiệu ứng làm chậm quá trình thủy hóa của XM và mang lại hiệu suất thấp. H. A. Umara và cs [14] nghiên cứu các tính chất cơ học và độ bền của SCC sử dụng (0 - 20)% NT theo khối lượng chất kết dính và ứng dụng cho kết cấu đường ray, kết quả nghiên cứu cho thấy bổ sung NT làm giảm cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo ép chẻ nhưng lại làm tăng cường độ chịu kéo uốn, đặc biệt là ở hàm lượng NT thấp. Độ bền của bê tông SCC được cải thiện đáng kể nhờ bổ sung NT, tỷ số giảm chấn của SCC tăng lên đến 22,8 - 30,6%, độ hấp thụ nước mao dẫn và độ thấm ion clo của các bê tông SCC cũng giảm đáng kể.

Mặc dù đã có một số nghiên cứu về tính chất độ bền của bê tông SCC sử dụng NT và ứng dụng cho kết cấu mặt đường ô tô, đường ray, nhưng đối với bê tông thường, đặc biệt là sự kết hợp của NT với XL và ứng dụng cho mặt đường ô tô gần như chưa được nghiên cứu. Bài báo này nhằm đánh giá tác động của các hàm lượng NT khác nhau (4%, 8%, 12% và 16%) kết hợp với 35% XL thay thế xi măng đến độ hấp thụ nước và độ thấm ion clo của bê tông. Ngoài ra, phân tích hiệu quả kinh tế và tác động môi trường của các bê tông cũng được đánh giá.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu chế tạo và thiết kế thành phần vật liệu BTXM

Các vật liệu chế tạo bê tông gồm: Xi măng PC50 (XM); phụ gia siêu dẻo (SD) giảm nước tầm cao Sika ViscoCrete 8566. Đá dăm (Đ) kích cỡ (4,75 - 12,5)mm; Cát (C) có mô-đun độ lớn bằng 2,70; xỉ lò cao nghiền mịn Hòa Phát S95 (XL); nước sạch sinh hoạt (N) để trộn các hỗn hợp bê tông và nhũ tương nhựa đường polyme cation (NT) loại CRS-1P. Các tính chất cơ, lý của các vật liệu như được cung cấp trong [9].

Thành phần vật liệu của BTXM được thiết kế theo ACI 211.1, hàm lượng NT được sử dụng lần lượt là 4%, 8%, 12% và 16% theo khối lượng của chất kết dính và XL được sử dụng để thay thế 35% khối lượng xi măng. Năm hỗn hợp được thiết kế gồm bê tông đối chứng không có NT (35XL0NT), bê tông chứa 4% NT (35XL4NT), bê tông chứa 8% NT (35XL8NT), bê tông chứa 12% NT (35XL12NT) và bê tông chứa 16% NT (35XL16NT). Thành phần vật liệu, cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn ở 28 ngày (R_{n28} và R_{ku28}) của các hỗn hợp bê tông được ghi trong Bảng 1 [9].

Bảng 1. Thành phần vật liệu của các hỗn hợp bê tông

Kí hiệu	Đ (kg)	C (kg)	X (kg)	XL (kg)	N (kg)	NT (kg)	SD (kg)	N/CKD	SN (cm)	R_{n28} (MPa)	R_{ku28} (MPa)
35XL0NT	1040,0	844,32	260,0	140,0	168,0	0,0	2,00	0,42	2-4	50,73	7,82
35XL4NT	1040,0	816,34	260,0	140,0	162,88	16,0	2,20			49,36	8,12
35XL8NT	1040,0	788,16	260,0	140,0	157,76	32,0	2,48			47,09	8,97
35XL12NT	1040,0	760,38	260,0	140,0	152,64	48,0	2,60			45,06	7,55
35XL16NT	1040,0	732,89	260,0	140,0	147,52	64,0	2,60			38,54	6,59

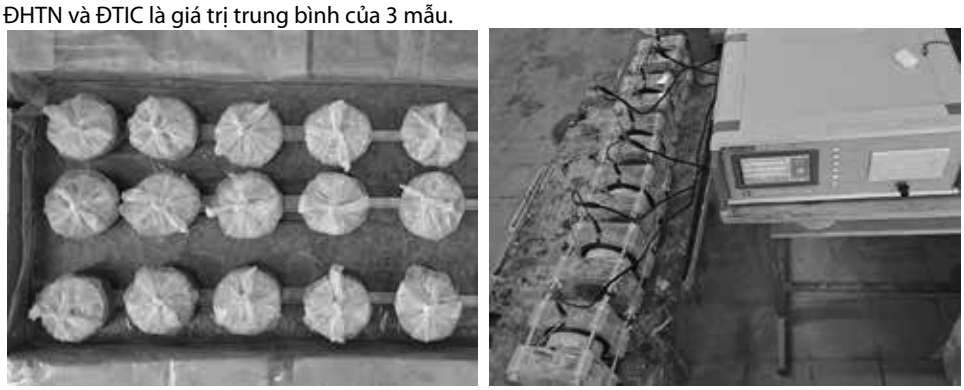
2.2. Chuẩn bị mẫu và phương pháp thí nghiệm

Sử dụng các mẫu trụ d×h = (100×200)mm để thí nghiệm xác định độ hấp thụ nước mao dẫn và độ thấm ion clo. Công tác đúc và bảo dưỡng các mẫu theo TCVN 3105:2022, các mẫu được tháo khuôn sau khi đúc khoảng 24h và ngâm trong nước cho đến ngày thí nghiệm.

Độ hấp thụ nước mao dẫn (ĐHTN) của các bê tông được xác định theo ASTM C1585-20 [15] ở các thời điểm 7, 28, 56 và 90 ngày, các mẫu kích thước d×h = (100×50)mm được cắt ra từ mẫu trụ và để khô trong không khí, tiến hành quét keo epoxy chống thấm xung quanh mẫu, chờ cho keo khô, đưa mẫu vào tủ sấy và sấy ở nhiệt độ 105^{0}C trong 24h, sau đó lấy mẫu ra để mẫu trong bình hút ẩm cho đến khi mẫu nguội bằng nhiệt độ phòng thì tiến hành thí nghiệm.

Độ thấm ion clo (ĐTIC) của các bê tông được xác định theo ASTM C1202-22 [16] ở các thời điểm 7, 28, 56, 90 và 150 ngày, sử dụng các mẫu tương tự như khi xác định ĐHTN, các mẫu được hút chân không theo quy định trước khi thí nghiệm.

Kết quả thí nghiệm ĐHTN và ĐTIC là giá trị trung bình của 3 mẫu.



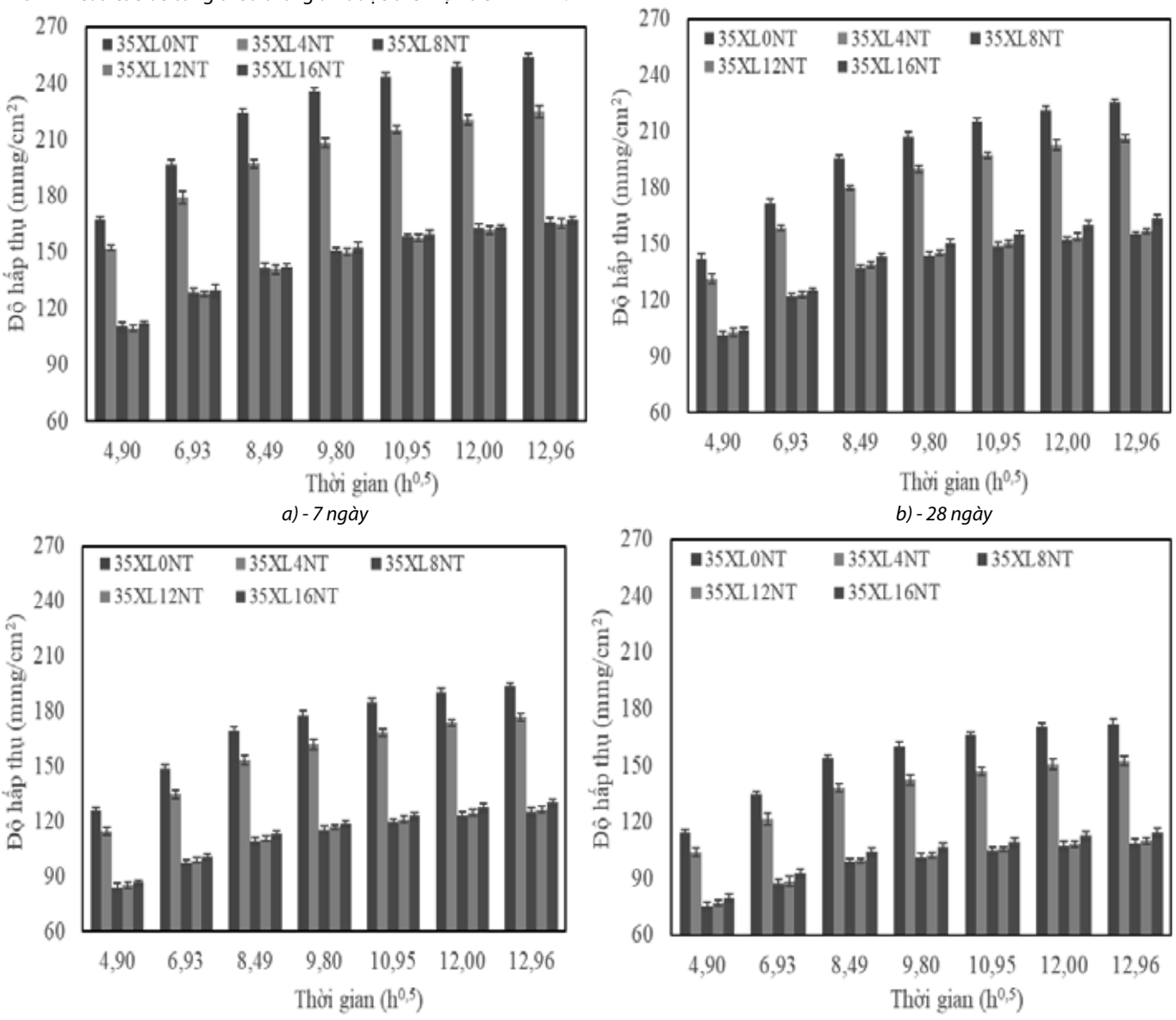
a) - Thí nghiệm ĐHTN *b) - Thí nghiệm ĐTIC*

Hình 1. Thí nghiệm ĐHTN và ĐTIC các bê tông

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ hấp thụ nước mao dẫn

ĐHTN của các bê tông theo thời gian được thể hiện trên Hình 2.



a) - 7 ngày

b) - 28 ngày

c) - 56 ngày

d) - 90 ngày

Hình 2. ĐHTN của các bê tông theo thời gian

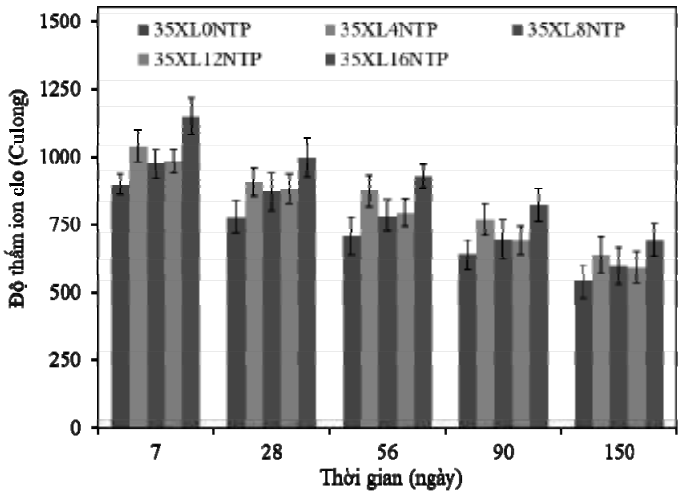
ĐHTN của các bê tông giảm đáng kể khi hàm lượng NT tăng lên, ở hàm lượng 8%NT và 12%NT, ĐHTN của các bê tông gần tương tự nhau và đạt giá trị thấp nhất, khi hàm lượng nhũ tương tăng lên 16%, ĐHTN có xu hướng tăng nhẹ. ĐHTN của các bê tông 35XL4NT, 35XL8NT, 35XL12NT và 35XL16NT ở 7 ngày giảm lần lượt tương ứng khoảng (8,9 - 12,1)%, (33,8 - 36,8)%, (34,4 - 37,2)% và (32,9 - 36,5)%; ở 28 ngày giảm lần lượt tương ứng khoảng (7,5 - 8,5)%, (28,9 - 31,3)%, (27,7 - 30,6)% và (26,9 - 27,8)%; ở 56 ngày giảm lần lượt tương ứng khoảng (8,7 - 9,3)%, (33,1 - 35,4)%, (32,5 - 34,8)% và (31,1 - 33,5)%; ở 90 ngày giảm lần lượt tương ứng khoảng (9,0 - 11,5)%, (33,9 - 36,9)%, (32,6 - 36,4)% và (30,3 - 34,0)% so với bê tông 35XL0NT.

ĐHTN của các bê tông chứa NT giảm là do màng nhựa đường hình thành sau quá trình nhũ hóa của NT, hệ thống màng nhựa này đan xen với các sản phẩm thủy hóa của XM và XL, đồng thời chúng lấp đầy các lỗ rỗng trong bê tông giúp cải thiện cấu trúc vi mô trở nên đặc chắc hơn [12, 13, 14]. Bên cạnh đó, tính kỵ nước của NT làm tăng góc tiếp xúc giữa nước và vữa xi măng dẫn đến sự gia tăng khả năng chống thấm nước của bê tông. Khi hàm lượng NT tăng lên đến 16%, ĐHTN của bê tông không giảm thêm nữa mà có xu hướng tăng nhẹ, điều này là do màng nhựa hình thành dày hơn trên bề mặt các hạt XM và XL gây ức chế phản ứng thủy hóa, làm giảm lượng sản phẩm CSH và giảm độ đặc của bê tông. Bên cạnh đó, khi trộn hỗn hợp với hàm lượng NT lớn, các chất nhũ hóa trong NT (là chất hoạt động bề mặt) có khả năng cuốn khí vào trong hỗn hợp làm gia tăng độ rỗng của bê tông.

3.2. Độ thấm ion clo

ĐTIC của các bê tông được thể hiện trên Hình 3. ĐTIC của tất cả các bê tông chứa NT có xu hướng tăng lên so với bê tông đối chứng 35XL0NT, xu hướng này là trái ngược với ĐHTN của chúng,

cụ thể, ĐTIC của các bê tông 35XL4NT, 35XL8NT, 35XL12NT và 35XL16NT cao hơn lần lượt khoảng (15,7 - 23,4)%, (8,4 - 11,8)%, (8,2 - 13,3)% và (27,9 - 30,9)% so với bê tông đối chứng 35XL0NT. Kết quả ĐTIC của các bê tông chứa NT nêu trên Hình 3 cũng có xu hướng trái ngược với các nghiên cứu trước đây của H. Zhang [13] và H. A. Umara [14], các nghiên cứu [13, 14] đều kết luận rằng NT làm giảm ĐTIC của bê tông, trong đó nghiên cứu [13] dùng phương pháp thí nghiệm đo trực tiếp độ sâu xâm nhập ion clo vào mẫu bê tông, còn nghiên cứu [14] dùng phương pháp đo bằng chỉ số điện lượng.



Hình 3. Độ thấm ion clo của các bê tông

Nguyên nhân chính của sự gia tăng ĐTIC không xuất phát từ việc suy giảm độ đặc chắc của bê tông mà do loại NT và bản chất cơ chế dẫn điện của phương pháp đo. Thành phần chất nhũ hóa cation hoạt tính bề mặt trong CRS-1P (bản chất mang điện tích dương để phân tán hạt nhựa đường trong nước) khi phân tách sẽ giải phóng các ion tự do vào trong hệ thống lỗ rỗng của bê tông. Dưới tác dụng của điện áp 60V trong quá trình thí nghiệm, các ion tự do này hoạt động như các vật mang điện mạnh làm tăng độ dẫn điện của mẫu bê tông và dẫn đến tăng ĐTIC. Mặc dù NT làm tăng cao ĐTIC nhưng tất cả các bê tông chứa NT đều có ĐTIC ở 28 ngày < 1.000 Culong nên được xếp loại ở mức thấm rất thấp [16]. Khi chỉ xét các bê tông chứa (4 - 16)% NT thì ĐTIC của chúng có xu hướng tương tự như ĐHTN, ĐTIC của các bê tông chứa 8% NT và 12% NT là thấp nhất và có giá trị tương tự như nhau. Khả năng chống xâm nhập ion clo của bê tông có mối liên hệ chặt chẽ với độ rỗng của nó [2, 3, 5, 7, 8], khi sử dụng hàm lượng (8 - 12)% NT dẫn đến làm giảm độ rỗng ở mức tối đa và ĐTIC đạt ở mức thấp nhất. Tuy nhiên, khi hàm lượng NT tăng lên trên 12%, màng nhựa đường hình thành trên bề mặt các hạt xi măng dày hơn làm chậm quá trình thủy hóa của XM, gây bất lợi cho việc hình thành cấu trúc và dẫn đến làm giảm khả năng chống xâm nhập ion clo. Ngoài ra, khi hàm lượng NT lớn làm tăng khả năng cuốn khí vào trong hỗn hợp trong quá trình trộn cũng góp phần gia tăng độ rỗng của bê tông. Kết quả nghiên cứu này có xu hướng tương đồng như các nghiên cứu trước đây [13, 14].

3.3. Hiệu quả kinh tế và tác động môi trường

Phân tích hiệu quả kinh tế và tác động môi trường khi sản xuất 1 m^3 bê tông bao gồm việc phân tích các yếu tố liên quan đến vật liệu, nhân công, thiết bị và các chi phí khác theo các yêu cầu cụ thể. Trong nghiên cứu này, chỉ phân tích chi phí và tác động môi trường về mặt vật liệu cho mỗi m^3, các yếu tố khác như vận chuyển, thi công, bảo trì… xem như không thay đổi cho tất cả các bê tông. Chi phí vật liệu, lượng phát thải khí carbon dioxide (CO_2) và mức tiêu hao năng lượng (EC) cho mỗi m^3 của các hỗn hợp được tính toán để so sánh với nhau. Chi phí vật liệu, lượng phát thải CO_2 và EC cho 1 kg nguyên liệu thô được đưa ra như trong Bảng 2.

Bảng 2. Chi phí, lượng phát thải CO_2 và tiêu hao năng lượng (EC) cho 1 kg nguyên liệu

Vật liệu	Chi phí (đ/kg)	Phát thải CO_2 (kg/kg)	Tiêu thụ năng lượng (MJ/kg)
Xi măng PC50	2.000	1,30 [2, 3]	11,80 [2, 3]
Cát sông	429	0,024 [2, 3]	0,34 [2, 3]
Xỉ lò cao	1.100	0,008 [2, 3]	0,11 [2, 3]
Nhũ tương	18.000	0,221 [17]	3,49 [17]
Đá dăm	340	0,036 [2, 3]	0,48 [2, 3]
Nước	10	0,0013 [2, 3]	0,017 [2, 3]
Siêu dẻo	37.000	0,60 [2, 3]	11,47 [2, 3]

Thực tế cho thấy hầu hết các bê tông dùng cho mặt đường hiện nay đều dùng bê tông thông thường sử dụng 100% xi măng (OPC). Trong nghiên cứu này, bê tông OPC được xem là loại bê tông sử dụng 400 kg xi măng và không có XL, lượng cát được xác định là 849,61 kg và hàm lượng SD cần thiết để đạt độ sụt 2,0 - 4,0 cm là 3,2 kg (xác định thông qua kiểm tra độ sụt của hỗn hợp), các thành phần vật liệu khác của hỗn hợp OPC giống như bê tông đối chứng 35XL0NT. Kết quả tính toán giá thành vật liệu, lượng phát thải CO_2 và EC để sản xuất 1 m^3 của từng loại bê tông được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Giá thành, xả thải CO_2 và EC để sản xuất 1 m^3 bê tông

Loại bê tông	Giá thành (triệu đồng/m^3)	Tỉ lệ giảm giá thành (%)	Phát thải CO_2 (kg/m^3)	Tỉ lệ giảm phát thải CO_2 (%)	EC (MJ/m^3)	Giảm EC (%)
OPC	1,64	0,0	580,0	0,0	5.625,4	0,0
35XL0NT	1,45	-10,5	398,2	-31,3	3.971,8	-29,4
35XL4NT	1,73	6,8	405,2	-30,1	3.997,4	-28,9
35XL8NT	2,02	24,2	412,2	-28,9	4.023,7	-28,5
35XL12NT	2,30	41,3	419,1	-27,7	4.048,4	-28,0
35XL16NT	2,58	58,2	426,0	-26,6	4.071,8	-27,6

Giá thành vật liệu của các bê tông chứa NT và XL đều tăng so với bê tông OPC, giá thành của các bê tông 35XL4NT, 35XL8NT, 35XL12NT và 35XL16NT tăng lần lượt tương ứng là 6,8%, 24,2%, 41,3% và 58,2% so với bê tông OPC, việc gia tăng giá thành là do NT có giá thành cao gấp nhiều lần so với các vật liệu khác. Tuy nhiên, về mặt tác động môi trường thì các bê tông chứa NT và XL mang lại hiệu quả đáng kể, lượng phát thải CO_2 và EC của các bê tông 35XL4NT, 35XL8NT, 35XL12NT và 35XL16NT giảm lần lượt tương ứng là 30,1% và 28,9%, 28,9% và 28,5%, 27,7% và 28,0%, 26,6% và 27,6% so với bê tông OPC.

4. KẾT LUẬN

Một số kết luận có thể được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

NT làm giảm đáng kể ĐHTN mao dẫn của các bê tông. ĐHTN của các bê tông 35XL4NT, 35XL8NT, 35XL12NT và 35XL16NT giảm

lần lượt tương ứng khoảng (7,5 - 12,1)%, (28,9 - 36,9)%, (27,7 - 37,2)% và (26,9 - 36,5)%, trong đó các bê tông chứa (8 - 12)% NT có ĐHTN thấp nhất.

ĐTIC của các bê tông chứa NT có xu hướng tăng lên so với bê tông đối chứng 35XL0NT có thể do bản chất của phương pháp thí nghiệm bằng chỉ số điện lượng. Tuy nhiên, sự thay đổi ĐTIC của các bê tông chứa (4 - 16)% NT có xu hướng và quy luật trùng khớp hoàn toàn với ĐHTN của chúng. Tất cả các bê tông chứa (4 - 16)% NT đều có ĐTIC ở 28 ngày ở mức rất thấp, trong đó bê tông chứa (8 - 12)% NT có ĐTIC thấp nhất.

Các bê tông chứa 4% NT, 8% NT, 12% NT và 16% NT có giá thành cao hơn lần lượt là 0,43%; 6,4%; 44,52% và 85,84%. Tuy nhiên, lượng phát thải CO_2 và tiêu thụ năng lượng của các bê tông chứa NT và XL lại giảm đáng kể so với bê tông OPC. Các bê tông chứa (4 - 16)% NT có lượng phát thải CO_2 và tiêu thụ năng lượng thấp hơn lần lượt khoảng (30,1 - 26,6)% và (28,9- 27,6)% so với bê tông OPC.

Xét tổng hợp về tính chất cơ học [9], tính chất thấm, phân tích hiệu quả kinh tế và đánh giá tác động môi trường, hàm lượng NT sử dụng tối ưu trong bê tông là 8%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hồ Văn Quân, Nguyễn Tấn Khoa, Phan Cao Thọ, Nguyễn Thanh Sang. Thực nghiệm hiện trường mặt đường bê tông hạt nhỏ sử dụng cát mịn và phụ gia khoáng ở tỉnh Quảng Ngãi. Tạp chí Giao thông vận tải, số 8, tr. 37-42, 2021.

[2] Q. V. Ho, Tuan H. N., Phuong N. P., Phuong H. N. L., Phat N., Rafat S..Recycling fly ash in high-performance concrete for sand conservation: durability, service life and environmental benefits. Innovative Infrastructure Solutions, no. 132, pp. 1-14, 2025, https://doi.org/10.1007/s41062-025-01936-9.

[3] T.-P. Huynh, Q. V. Ho. Systematic assessment of the technical performance, durability, costs and environmental impact of sustainable concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. Environmental Progress & Sustainable Energy, no. 44, pp. 1-20, 2025, https://doi.org/10.1002/ep.70050.

[4] Q. V. Ho, Phuong N. P. Durability properties and steel corrosion resistance of reinforced concrete using fly ash and ground granulated blast furnace slag as partial replacements for sand and cement. Innovative Infrastructure Solutions, no. 9(178), pp. 1-18, 2024, https://doi.org/10.1007/s41062-024-01499-1.

[5] Q. V. Ho, T. H. M. Le and T.-P. Huynh. The influence of pre-compression on the durability of high-performance concrete incorporating industrial by-products. Journal of Materials: Design and Applications, no. 238(5), pp. 901-915, 2024, https://doi.org/10.1177/14644207231203350.

[6] Q. V. Ho, T.-P. Huynh. Improving Corrosion Resistance and Prolonging the Service Life of High-performance Concrete Structures Using Fly Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag, Periodica Polytechnica Civil Engineering, no. 68(2), pp. 669-683, 2024, https://doi.org/10.3311/PPci.23572.

[7] Q. V. Ho, T.-P. Huynh. A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products. Journal of Building Engineering, no. 80, 107982, 2023, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107982.

[8] T.-P. Huynh, L. S. Ho, Q. V. Ho. Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag. Construction and Building Materials, no. 347, pp. 1-13, 2022, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128512.

[9] H. V. Quân, N. D. Trường, N. T. Duy, P. T. Uyết. Ảnh hưởng của nhũ tương nhựa đường đến tính chất cơ học của BTXM - xỉ lò cao dùng cho mặt đường ô tô. Tạp chí Cầu đường Việt Nam, số 6, tr. 19-23, 2026.

[10] Z. Wang, X. Shu, T. Rutherford, B. Huang, D. Clarke. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar. Construction and Building Materials, no. 75, pp. 25-30, 2015, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.013.

[11] W. Liu, Y. Huang, Y. He, H. Wei, R. Bai, H. Li, Q. Cui and S. Li. Investigation of Flexibility Enhancement Mechanisms and Microstructural Characteristics in Emulsified Asphalt and Latex-Modified Cement. Sustainability, no. 17, 6317, 2025, https://doi.org/10.3390/su17146317.

[12] M. Zhang, Y. Jing, Y. Yang, J. Zhang, G. Huang, Q. Wanga, P. Wei. The influence of emulsified asphalt on mechanical properties of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, no. 297, 123842, 2021, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123842.

[13] H. Zhang, J. Zhang, Y. Yang, Q. Hu, Y. He, P. Wei. Effects of asphalt emulsion on the durability of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, no. 292, 123322, 2022, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123322.

[14] H. A. Umara,b, X. Zenga, X. Lana, H. Zhua, Y. Lia and H. Liua. Evaluation of the Influence of Asphalt Emulsion on the Strength, Durability and Damping Performance of Filling Layer Self-Compacting Concrete. KSCE Journal of Civil Engineering, pp. 1-14, 2022, https://doi.org/10.1007/s12205-022-0155-9.

[15] ASTM C1585. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, 2020.

[16] ASTM C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2022.

[17] J. Chehovits and L. Galehous, Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements. Paper presented at the International Conference on Pavement Preservation (ICPP 2010). Retrieved from TRID Database, pp. 27-42, 2010.

■ Ngày nộp bài: 20/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 04/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2026

Phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông

A method for determining the chloride ion diffusion coefficient in concrete

> TS PHẠM HOÀNG[1], **TS NGÔ VIỆT ĐỨC**[2,*]
[1]Bộ môn Xây dựng Nhà & CTCN, Học viện Kỹ thuật Quân sự
[2]Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: ducnv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Ion clorua (Cl^-) là một trong những tác nhân có ảnh hưởng lớn đến độ bền của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt đối với các công trình làm việc trong môi trường biển hoặc môi trường có chứa muối. Ion clorua xâm nhập qua hệ thống lỗ rỗng của bê tông, khi chạm đến vị trí cốt thép, quá trình ăn mòn sẽ bắt đầu. Tốc độ xâm nhập ion clorua vào bê tông phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó hệ số khuếch tán là một tham số quan trọng để mô tả khả năng vận chuyển ion trong vật liệu. Việc xác định chính xác hệ số này có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá khả năng chống xâm nhập clorua và dự báo tuổi thọ kết cấu BTCT. Bài báo trình bày cơ sở của quá trình xâm nhập ion clorua vào bê tông, làm rõ khái niệm hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng, đồng thời phân tích các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua, đề xuất định hướng lựa chọn phương pháp xác định phù hợp.

Từ khóa: Ion clorua; bê tông cốt thép; khuếch tán clorua; độ bền; tuổi thọ kết cấu.

ABSTRACT

Chloride ions (Cl^-) are among the major factors affecting the durability of reinforced concrete structures, particularly those exposed to marine environments or chloride-containing environments. Chloride ions penetrate concrete through its pore system and when they reach the reinforcing steel, the corrosion process may initiate. The rate of chloride ion ingress into concrete depends on various factors, among which the chloride ion diffusion coefficient is an important parameter for characterizing the transport of chloride ions through the material. Accurate determination of this coefficient is essential for evaluating the resistance of concrete to chloride ingress and predicting the service life of reinforced concrete structures. This paper presents the fundamental principles of chloride ion ingress into concrete, clarifies the concepts of the apparent diffusion coefficient and the effective diffusion coefficient and analyzes methods for determining the chloride ion diffusion coefficient. Based on this analysis, an appropriate approach for selecting the determination method is proposed.

Keywords: Chloride ions; reinforced concrete; chloride diffusion; durability; structural service life.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

BTCT là loại vật liệu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng và hạ tầng kỹ thuật nhờ khả năng chịu lực tốt, độ bền cao và khả năng thích ứng với nhiều điều kiện khai thác. Tuy nhiên, trong quá trình sử dụng, kết cấu BTCT có thể chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố môi trường, làm suy giảm dần các đặc tính ban đầu của vật liệu và kết cấu. Trong số đó, sự xâm nhập của ion clorua là một trong những nguyên nhân quan trọng gây suy giảm độ bền, đặc biệt đối với các công trình làm việc trong môi trường biển hoặc thường xuyên tiếp xúc với các nguồn chứa muối.

Ion clorua tồn tại phổ biến trong nước biển, vùng ven biển và môi trường có chứa muối. Khi bề mặt bê tông tiếp xúc với môi trường chứa clorua, các ion này có thể xâm nhập vào hệ thống lỗ rỗng và di chuyển từ bề mặt vào sâu bên trong. Quá trình vận chuyển phụ thuộc vào đặc tính của vật liệu và điều kiện môi trường. Ion clorua tự bản thân không gây phá hoại trực tiếp cho bê tông, khi ion clorua chạm đến bề mặt cốt thép và đạt đến một mức nhất định, lớp bảo vệ cốt thép bị phá vỡ và quá trình ăn mòn bắt đầu phát triển [1, 2]. Có thể xem quá trình tác động của ion clorua lên kết cấu BTCT như sau: Môi trường chứa clorua → ion clorua xâm nhập bê tông → ion clorua lan truyền đến vị trí cốt thép → phá vỡ trạng thái thụ động → khởi đầu ăn mòn cốt thép → phát triển ăn mòn → suy giảm độ bền và tuổi thọ kết cấu.

Trong chuỗi quá trình này, tốc độ xâm nhập của ion clorua từ môi trường vào bê tông có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Nếu bê tông có khả năng làm chậm sự xâm nhập, thời gian để ion clorua đạt đến cốt thép sẽ dài hơn và nguy cơ ăn mòn cốt thép được trì hoãn. Ngược lại, nếu ion clorua có thể di chuyển nhanh qua bê tông, thời gian đến khi đạt ngưỡng gây ăn mòn có thể giảm đáng kể.

Có thể thấy rõ, tuổi thọ của kết cấu BTCT làm việc trong môi trường có ion clorua quan hệ chặt chẽ với khả năng chống lại sự xâm nhập và tốc độ khuếch tán của ion clorua trong bê tông.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ QUÁ TRÌNH KHUẾCH TÁN ION CLORUA

2.1. Cơ chế xâm nhập

Bê tông là vật liệu có cấu trúc rỗng với hệ thống lỗ rỗng có kích thước và mức độ liên thông khác nhau. Khi bê tông tiếp xúc với môi trường chứa ion clorua, các ion này có thể xâm nhập thông qua hệ thống lỗ rỗng và các vùng liên thông trong vật liệu.

Trong điều kiện đơn giản, khi có sự chênh lệch nồng độ giữa bề mặt và bên trong bê tông, ion clorua có xu hướng chuyển động từ nơi có nồng độ cao đến nơi có nồng độ thấp. Đối với quá trình khuếch tán một chiều, tuân theo định luật Fick thứ nhất:

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x}$$

Trong đó: J - Dòng khuếch tán (mol/m^2.s); D - Hệ số khuếch tán (m^2/s); C - Nồng độ (mol/m^3); x - Chiều sâu tính từ bề mặt bê tông (m). Dấu âm trong phương trình thể hiện hướng chuyển động của ion từ nơi có nồng độ cao đến nơi có nồng độ thấp.

2.2. Phương trình khuếch tán

Khi xét sự thay đổi nồng độ ion clorua theo cả chiều sâu và thời gian, quá trình vận chuyển có thể được mô tả bằng định luật Fick thứ hai:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Nếu giả thiết hệ số khuếch tán là không đổi và quá trình xâm nhập xảy ra theo một chiều, nghiệm của phương trình có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i)\,\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Trong đó: $C(x,t)$ - Nồng độ ion clorua tại chiều sâu x và thời gian t; C_i - Nồng độ ion clorua ban đầu trong bê tông; C_s - Nồng độ ion clorua tại bề mặt bê tông; D - Hệ số khuếch tán ion clorua; x - Chiều sâu tính từ bề mặt; t - Thời gian tiếp xúc với môi trường; erfc - Hàm sai số bổ sung.

2.3. Hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng

Có hai khái niệm cần phân biệt là hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng.

Hệ số khuếch tán biểu kiến D_a thường được xác định từ sự thay đổi của nồng độ clorua trong bê tông theo thời gian, giá trị D_a phản ánh đặc tính vận chuyển tổng hợp trong điều kiện thí nghiệm. Do có xét đến hiện tượng cố định clorua trong vật liệu nên có thể làm giảm lượng ion tự do tham gia vận chuyển.

Hệ số khuếch tán hiệu dụng D_e được sử dụng để mô tả khả năng vận chuyển của ion trong hệ thống lỗ rỗng của bê tông dưới những điều kiện và giả thiết nhất định.

Vì vậy, khi sử dụng kết quả thí nghiệm để đánh giá độ bền, cần xác định rõ loại hệ số khuếch tán, phương pháp xác định và điều kiện thí nghiệm. Đây cũng là cơ sở để lựa chọn phương pháp xác định hệ số khuếch tán phù hợp với từng mục đích cụ thể.

2.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến hệ số khuếch tán

Hệ số khuếch tán ion clorua phụ thuộc vào đặc tính của bê tông và điều kiện môi trường. Trong đó, hệ thống lỗ rỗng của bê tông có vai trò đặc biệt quan trọng. Các yếu tố như tỷ lệ nước/xi măng, loại và thành phần xi măng, mức độ thủy hóa, độ rỗng, độ bão hòa và khả năng cố định ion clorua đều có thể làm thay đổi khả năng vận chuyển ion trong bê tông [4, 5]. Do vậy, hệ số khuếch tán không nên xem là một hằng số cố định mà phải gắn với điều kiện vật liệu, môi trường và phương pháp xác định.

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHUẾCH TÁN ION CLORUA

Hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông có thể được xác định bằng nhiều phương pháp khác nhau. Về nguyên tắc, các phương pháp này dựa trên hai cơ chế vận chuyển chính: Khuếch tán tự nhiên do chênh lệch nồng độ và sự di chuyển ion dưới tác dụng của điện trường. Có thể phân loại các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua thành bốn nhóm:

1. Khuếch tán tự nhiên đạt trạng thái ổn định.
2. Khuếch tán tự nhiên chưa đạt trạng thái ổn định.
3. Tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán ổn định.
4. Tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán chưa ổn định.

Sự khác nhau cơ bản giữa các phương pháp nằm ở động lực gây ra sự chuyển động của ion clorua, trạng thái vận chuyển tại thời điểm đo, thời gian thí nghiệm và cách xác định hệ số khuếch tán. Các phương pháp khuếch tán tự nhiên có điều kiện vận chuyển gần với quá trình xảy ra trong kết cấu thực tế, nhưng cần thời gian dài. Ngược lại, việc sử dụng điện trường có thể làm tăng tốc độ di chuyển của ion clorua và rút ngắn đáng kể thời gian thí nghiệm.

3.1. Phương pháp khuếch tán tự nhiên đạt trạng thái ổn định

Phương pháp khuếch tán tự nhiên ở trạng thái ổn định dựa trên sự chuyển động của ion clorua dưới tác dụng của gradient nồng độ.

Mẫu bê tông được đặt giữa hai khoang dung dịch. Một phía của mẫu tiếp xúc với dung dịch có nồng độ ion clorua cao, trong khi phía còn lại có nồng độ thấp hơn hoặc không chứa ion clorua. Sự chênh lệch nồng độ tạo ra dòng khuếch tán ion clorua xuyên qua mẫu, được xác định từ tốc độ gia tăng nồng độ clorua trong dung dịch phía nồng độ thấp [3].

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp là cơ chế vận chuyển hoàn toàn dựa trên khuếch tán tự nhiên, do đó có ý nghĩa tốt trong việc nghiên cứu cơ chế xâm nhập ion clorua. Tuy nhiên, hạn chế chính là thời gian thí nghiệm rất dài. Đối với mẫu bê tông thông thường có chiều dày khoảng 3 cm, thời gian để đạt trạng thái ổn định có thể kéo dài trên một năm [3]. Điều này làm cho phương pháp không thuận lợi khi cần đánh giá nhanh nhiều loại bê tông hoặc để so sánh các loại vật liệu chế tạo.

3.2. Phương pháp khuếch tán tự nhiên chưa đạt trạng thái ổn định

Khác với phương pháp trạng thái ổn định, phương pháp khuếch tán tự nhiên ở trạng thái này không yêu cầu chờ cho quá trình khuếch tán đạt trạng thái ổn định.

Sau một khoảng thời gian, khi ion clorua từ bề mặt mẫu phía tiếp xúc với dung dịch có nồng độ cao xâm nhập vào bên trong bê tông, mẫu được lấy ra và xác định sự phân bố nồng độ ion clorua theo chiều sâu. Kết quả sẽ xác định được hệ số khuếch tán biểu kiến D_a thông qua nghiệm của định luật Fick thứ hai, bằng cách khớp đường cong phân bố nồng độ clorua thực nghiệm với nghiệm của phương trình Fick thứ hai.

Ưu điểm của phương pháp là điều kiện gần với quá trình xâm nhập ion clorua tự nhiên và không cần sử dụng điện trường. Phương pháp cũng không yêu cầu chờ đến khi đạt trạng thái ổn định nên có thời gian thí nghiệm ngắn hơn đáng kể so với phương pháp đạt trạng thái ổn định. Tuy nhiên, phương pháp vẫn cần thời gian tương đối dài và yêu cầu xác định nồng độ clorua tại nhiều chiều sâu. Việc lấy mẫu và phân tích hóa học có thể làm tăng thời gian và công sức thí nghiệm [3].

3.3. Phương pháp tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán ổn định

Mẫu bê tông được đặt giữa hai khoang dung dịch và hai điện cực được bố trí ở hai phía của mẫu. Khi đặt hiệu điện thế giữa hai điện cực, ion clorua chịu tác dụng của điện trường và chuyển động theo hướng tương ứng với điện tích của ion. Cơ chế vận chuyển lúc này không chỉ phụ thuộc vào gradient nồng độ mà còn chịu ảnh hưởng của gradient điện thế. Thực hiện thí nghiệm đến khi dòng ion clorua đi qua mẫu đạt trạng thái ổn định, kết hợp với chiều dày mẫu, nồng độ dung dịch, hiệu điện thế và các thông số liên quan, có thể xác định hệ số khuếch tán.

So với phương pháp khuếch tán tự nhiên, việc sử dụng điện trường giúp quá trình đạt trạng thái ổn định nhanh hơn, giảm đáng kể thời gian thí nghiệm [3, 4].

3.4. Phương pháp tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán chưa ổn định

Đây là phương pháp có ý nghĩa đặc biệt đối với nghiên cứu thực nghiệm vì có thể rút ngắn đáng kể thời gian xác định hệ số khuếch tán [3, 4]. Phương pháp này dựa trên việc tạo ra sự di chuyển cưỡng bức của ion clorua qua mẫu bằng điện trường, sau đó xác định chiều sâu xâm nhập của ion clorua để tính hệ số khuếch tán biểu kiến.

4. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP

Các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông được xây dựng trên những cơ chế vận chuyển khác nhau. Vì vậy, việc lựa chọn phương pháp không chỉ phụ thuộc vào khả năng thực hiện thí nghiệm mà trước hết phải căn cứ vào mục đích xác định hệ số khuếch tán. Bảng 1 tổng hợp thông tin cơ bản của các phương pháp.

Bảng 1. Tổng hợp các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông

Tiêu chí	Khuếch tán tự nhiên - trạng thái ổn định	Khuếch tán tự nhiên - trạng thái chưa ổn định	Có điện trường - trạng thái ổn định	Có điện trường - trạng thái chưa ổn định
Động lực vận chuyển	Gradient nồng độ	Gradient nồng độ	Điện trường + gradient nồng độ	Điện trường + gradient nồng độ
Trạng thái	Ổn định	Chưa ổn định	Ổn định	Chưa ổn định
Thời gian thực hiện	Rất dài	Dài	Ngắn	Rất ngắn
Điều kiện gần thực tế	Cao	Cao	Trung bình	Thấp
Đại lượng đặc trưng	D_e	D_a	D_e	D_{nssm}
Phân tích kết quả	Dòng Cl^- qua mẫu	Giá trị Cl^- theo chiều sâu	Dòng Cl^- qua mẫu	Giá trị Cl^- theo chiều sâu
Ưu điểm chính	Mô phỏng tự nhiên	Mô phỏng tự nhiên, không cần trạng thái ổn định	Nhanh hơn khuếch tán tự nhiên	Rất nhanh
Hạn chế chính	Thời gian rất dài	Cần phân tích Cl^- theo chiều sâu	Xác định mối quan hệ giữa 2 đại lượng	Giới hạn về khả năng sử dụng
Phạm vi nên sử dụng	Nghiên cứu trong điều kiện gần với môi trường thực tế	Nghiên cứu quá trình vận chuyển, các đặc trưng khuếch tán trong điều kiện tự nhiên	Đánh giá ảnh hưởng của các thông số vật liệu	Cần thời gian ngắn, cần một tham số định lượng để đánh giá

Bảng 1 cho thấy một sự đánh đổi giữa mức độ mô phỏng điều kiện tự nhiên và tốc độ thí nghiệm. Mức độ gần với điều kiện tự nhiên thì thời gian thí nghiệm tăng. Ngược lại, nếu giảm thời gian thí nghiệm thì cần diễn giải rõ hệ số thu được để xác định cụ thể khả năng sử dụng của kết quả.

Có thể thấy rõ việc sử dụng các phương pháp khác nhau trong việc thiết lập và hiệu chỉnh các mô hình tính tốc độ thấm của ion clorua trong vật liệu bê tông xi măng của các tác giả như Duracrete, Maage và Poulsen, Takewaka, Francy… [6].

5. KẾT LUẬN

Hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông là một tham số quan trọng để đánh giá khả năng chống lại sự xâm nhập của ion clorua và phục vụ dự báo độ bền của kết cấu BTCT. Các phương pháp xác định hệ số khuếch tán có thể được thực hiện ở điều kiện mô phỏng tự nhiên hoặc kết hợp với điện trường; đồng thời được đo ở trạng thái ổn định hoặc trạng thái chưa ổn định. Phương pháp xác định khi dòng ion chưa đạt trạng thái ổn định có ưu điểm rõ rệt về thời gian thí nghiệm do đó phù hợp với việc đánh giá nhanh.

Việc xác định chính xác hệ số khuếch tán ion clorua không chỉ giúp đánh giá chất lượng và khả năng chống xâm nhập clorua của bê tông mà còn tạo cơ sở định lượng cho quá trình dự báo thời gian bắt đầu bị ăn mòn, tốc độ ăn mòn của cốt thép và tuổi thọ của kết cấu BTCT.

Hệ số thu được từ mỗi phương pháp có ý nghĩa vật lý khác nhau và phụ thuộc vào các giả thiết của phương pháp. Do vậy, khi sử dụng hệ số khuếch tán trong mô hình dự báo tuổi thọ, cần xác định rõ phương pháp thí nghiệm, điều kiện thí nghiệm và loại hệ số thu được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] BARON, OLLIVIER. Durabilité des bétons. Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées, 1992.

[2] VU.N.T. Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabilité. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.

[3] F. DEBY. Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.

[4] DURACRETE. Probabilistic Performance based durability design of concrete structures. Brit Euram Project, $n^0$1347, 1999.

[5] E. POULSEN. Description of exposure to Chloride of Marine Concrete Structures Proposal for a standard. International RILEM Workshop Chloride penetration into concrete, 1995.

[6] DUC.N.V. Giới thiệu một số mô hình tính tốc độ thấm của clorua trong vật liệu bê tông xi măng và khả năng ứng dụng trong điều kiện Việt Nam. Tạp chí Giao thông vận tải, ISSN 2354-0818, tháng 11, tr. 67-70, 2018.

■Ngày nhận bài: 20/7/2026 ■Ngày sửa bài: 27/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 10/8/2026

Từ dữ liệu thiên văn đến trực quan hóa chiếu sáng bằng AI: Một phương pháp dẫn xuất hình học trong kiến trúc

From astronomical data to AI-assisted architectural lighting visualization: A geometric derivation method

> THS.KTS NGUYỄN NGỌC THI
Trường Đại học Kiến trúc TP Hồ Chí Minh
Email: thi.nguyenngoc@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Chiếu sáng trong kiến trúc có vai trò quan trọng trong nghiên cứu và thiết kế, từ đánh giá điều kiện ánh sáng đến kiểm soát tác động của bức xạ Mặt Trời. Tuy nhiên, vẫn tồn tại khoảng cách giữa dữ liệu thiên văn, mô hình hình học và trực quan hóa kết quả, đặc biệt trong việc duy trì sự tương ứng giữa hướng chiếu sáng và bóng đổ. Trí tuệ nhân tạo (AI) tạo sinh mở rộng khả năng trực quan hóa kiến trúc, nhưng kết quả cần được kiểm soát trên cơ sở hình học và vật lý.

Nghiên cứu đề xuất phương pháp dẫn xuất hình học, sử dụng Hình học họa hình để chuyển đổi dữ liệu Mặt Trời thành cơ sở hình học để xác lập hướng chiếu và bóng đổ. Các quan hệ hình học được kiểm chứng trước khi chuyển sang phối cảnh và AI để trực quan hóa.

Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất duy trì được sự tương ứng giữa dữ liệu Mặt Trời, hướng chiếu, bóng đổ và biểu diễn hình học, tạo cơ sở kiểm soát độ tin cậy của kết quả trực quan hóa. Nghiên cứu làm rõ vai trò của Hình học họa hình như lớp trung gian kết nối dữ liệu thiên văn với mô phỏng và trực quan hóa chiếu sáng trong kiến trúc.

Từ khóa: Hình học họa hình; chiếu sáng kiến trúc; trí tuệ nhân tạo; đào tạo kiến trúc.

ABSTRACT

Architectural lighting is important in assessing lighting conditions and controlling solar radiation. However, a gap remains between astronomical data, geometric models, and visual representation, particularly in maintaining correspondence between light direction and cast shadows. Generative artificial intelligence (AI) enhances architectural visualization, but its outputs require geometric and physical control.

This study proposes a geometric derivation method using Descriptive Geometry to transform solar data into a geometric basis for establishing light direction and cast shadows. The geometric relationships are verified before perspective representation and AI-based visualization.

The results show that the method maintains correspondence among solar data, light direction, cast shadows, and geometric representations, supporting control of AI-generated visualization. Descriptive Geometry serves as an intermediate layer linking astronomical data with the representation and visualization of architectural lighting.

Keywords: Descriptive geometry; architectural lighting; artificial intelligence; architectural education.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ánh sáng là thành phần quan trọng của không gian kiến trúc, tác động đồng thời đến khả năng quan sát, cảm nhận thị giác, tiện nghi và hiệu quả sử dụng năng lượng. Sự phát triển của các công cụ mô phỏng như RADIANCE đã tạo điều kiện phân tích sự truyền và phân bố ánh sáng dựa trên các mô hình vật lý, hỗ trợ đánh giá và điều chỉnh giải pháp thiết kế [3]. Tuy nhiên, phía sau các phép tính mô phỏng vẫn là những quan hệ hình học giữa nguồn sáng, đối tượng, hướng truyền tia sáng và bề mặt nhận sáng.

Hình học họa hình cung cấp hệ thống phương pháp để biểu diễn và giải quyết các quan hệ không gian thông qua phép chiếu, dựng bóng và phối cảnh [2]. Trong bài toán chiếu sáng tự nhiên, vị trí biểu kiến của Mặt Trời có thể được chuyển thành hướng chiếu, từ đó xác định sự hình thành và biến đổi của bóng đổ trên công trình. Việc duy trì sự tương ứng giữa các hình chiếu vì vậy có ý nghĩa đối với khả năng kiểm tra và diễn giải kết quả. Tuy nhiên, mối liên hệ này chưa được khai thác đầy đủ để xây dựng một phương pháp chuyển đổi dữ liệu thiên văn thành các quan hệ hình học có thể kiểm chứng trong nghiên cứu và đào tạo kiến trúc.

Sự xuất hiện của AI tạo sinh tạo thêm khả năng trực quan hóa

nhanh các ý tưởng và kết quả thiết kế [5]. Tuy nhiên, việc tạo hình trực quan cần được đặt trong mối quan hệ với dữ liệu hình học và cơ sở vật lý của bài toán nếu kết quả được sử dụng cho mục đích phân tích và diễn giải. Do đó, cần có một lớp trung gian hình học để kiểm soát nội dung trước khi chuyển sang hình ảnh trực quan.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một phương pháp dẫn xuất hình học nhằm kết nối dữ liệu đường đi Mặt Trời với hiện tượng chiếu sáng trong kiến trúc, sử dụng hình học họa hình để xác lập và kiểm chứng các quan hệ giữa hướng chiếu, bóng đổ và hình phối cảnh, đồng thời khai thác AI như một công cụ trực quan hóa.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Quan hệ giữa hình học và mô phỏng chiếu sáng

Mô phỏng chiếu sáng kiến trúc là quá trình xác định và đánh giá sự phân bố ánh sáng trong không gian dựa trên mối quan hệ giữa nguồn sáng, hình học công trình, đặc tính vật liệu và các bề mặt nhận sáng. Trong các hệ thống mô phỏng dựa trên cơ sở vật lý, mô hình hình học của công trình là một thành phần quan trọng để xác định đường truyền, sự tương tác và phân bố của ánh sáng trong không gian [3].

Xét về bản chất hình học, ánh sáng có thể được xem là tập hợp các tia truyền theo những hướng xác định. Khi tia sáng gặp một vật thể, phần không gian phía sau vật thể không nhận được tia sáng trực tiếp và hình thành vùng bóng đổ [2]. Do đó, bóng đổ có thể được xác định thông qua quan hệ giữa hướng chiếu, hình dạng vật thể và mặt phẳng nhận bóng.

Hình học họa hình cung cấp các phương pháp biểu diễn những quan hệ không gian này thông qua phép chiếu, dựng bóng và phối cảnh [1, 2]. Với một hướng chiếu xác định, các điểm đặc trưng của vật thể có thể được chiếu theo cùng một phương lên mặt phẳng nhận bóng để xác định vị trí các điểm tương ứng của bóng. Việc nối các điểm này theo quan hệ hình học của vật thể cho phép xác định hình dạng bóng đổ.

Từ đó, nghiên cứu xem hình học họa hình như một lớp trung gian giữa dữ liệu Mặt Trời và hình thức biểu diễn kiến trúc. Cơ sở vật lý của chiếu sáng là nền tảng cho mô phỏng, trong khi hình học họa hình cho phép xác lập và kiểm soát quan hệ giữa nguồn sáng, công trình và bóng đổ trước khi chuyển sang các dạng biểu diễn trực quan.

2.2. Dữ liệu Mặt Trời và xác lập hướng chiếu

Trong chiếu sáng tự nhiên, vị trí biểu kiến của Mặt Trời thay đổi theo thời gian, ngày trong năm và tọa độ địa lý của công trình. Hai thông số quan trọng để xác định vị trí Mặt trời là góc phương vị *A* và góc cao độ *h*. Góc phương vị xác định hướng của Mặt trời trên mặt bằng, còn góc cao độ xác định độ cao của Mặt trời so với mặt phẳng chân trời [4].

Biểu đồ đường đi Mặt Trời là phương tiện trực quan để xác định vị trí Mặt Trời tại một thời điểm và địa điểm cụ thể. Về mặt phương pháp, điều quan trọng đối với nghiên cứu không chỉ là hình dạng của biểu đồ mà là khả năng chuyển một vị trí xác định trên biểu đồ thành một hướng chiếu cụ thể trong hệ hình chiếu của công trình.

Quá trình chuyển đổi được thực hiện bằng hai phương thức, trong đó phương pháp lượng giác được sử dụng làm cơ sở định lượng và phương pháp hình học được sử dụng để biểu diễn, kiểm chứng trực tiếp trên bản vẽ.

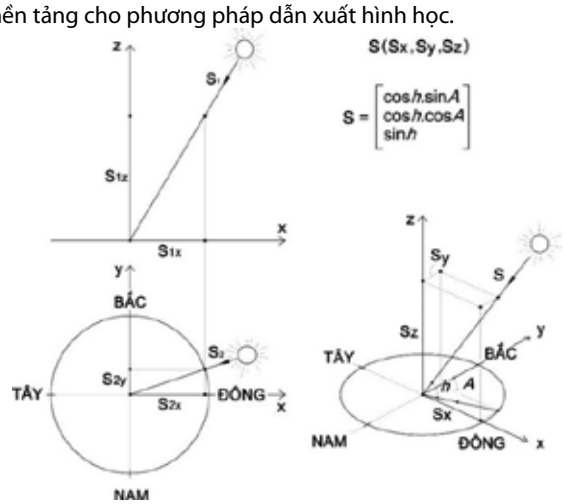
Phương thức 1 - Xác lập hướng chiếu bằng lượng giác: nghiên cứu quy ước hệ tọa độ công trình gồm X theo hướng Đông, Y theo hướng Bắc và Z theo phương thẳng đứng.

Với góc phương vị *A* được đo từ hướng Bắc theo chiều kim đồng hồ, vectơ đơn vị hướng Mặt Trời được biểu diễn thông qua tia sáng S=(cos*h*sin*A*, cos*h*cos*A*, sin*h*). (Hình 1)

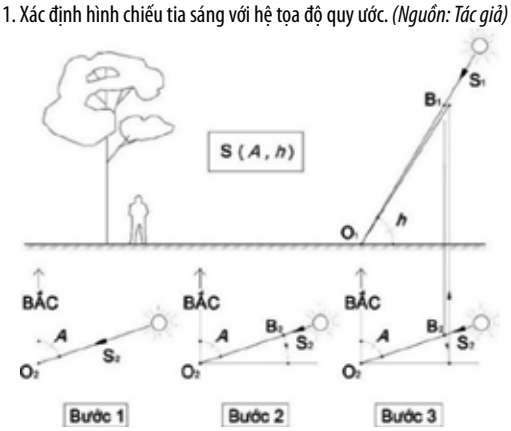
Phương thức 2 - Xác lập hướng chiếu bằng hình học: bên cạnh phương pháp lượng giác, hướng chiếu được xác lập trực tiếp trên bản vẽ bằng phương pháp hình học kết hợp phép quay hình. Vị trí Mặt Trời xác định từ biểu đồ đường đi Mặt Trời được chuyển vào hệ hình chiếu của công trình. Thông qua phép quay hình [1], hướng tia sáng được xác định trên mặt phẳng bản vẽ ở mặt đứng, từ đó có thể dựng đường chiếu qua các điểm đặc trưng của vật thể.

Hình 2, mô tả các bước xác định hướng chiếu theo phương thức 2.

Phương pháp này cho phép biểu diễn trực tiếp mối quan hệ giữa vị trí Mặt Trời, hướng tia sáng, công trình và mặt phẳng nhận bóng. Đây là ưu điểm của hình học họa hình, bởi hướng chiếu không chỉ được biểu diễn dưới dạng giá trị số mà còn được thể hiện bằng quan hệ hình học có thể quan sát và kiểm tra trên bản vẽ. Qua đó, dữ liệu thiên văn được chuyển thành biểu diễn hình học có thể kiểm chứng, tạo nền tảng cho phương pháp dẫn xuất hình học.



Hình 1. Xác định hình chiếu tia sáng với hệ tọa độ quy ước. *(Nguồn: Tác giả)*



Hình 2. Xác định hình chiếu tia sáng bằng hình học. *(Nguồn: Tác giả)*

Trong đó, góc phương vị quyết định hướng bóng đổ trên mặt bằng, còn góc cao độ ảnh hưởng đến độ nghiêng của tia sáng và chiều dài bóng đổ. Mối quan hệ này là cơ sở để bảo đảm sự thống nhất giữa dữ liệu thiên văn, hình chiếu thẳng góc và hình phối cảnh trong các bước tiếp theo của nghiên cứu.

2.3. Dựng bóng đổ thẳng góc theo dữ liệu Mặt Trời

Trong bài toán chiếu sáng trực tiếp từ Mặt Trời, do khoảng cách từ Mặt Trời đến công trình rất lớn so với kích thước công trình, có thể xem các tia sáng Mặt Trời là những tia song song. Với giả thiết này, hướng của tia sáng tại một thời điểm xác định được xem là không đổi trên toàn bộ công trình [2].

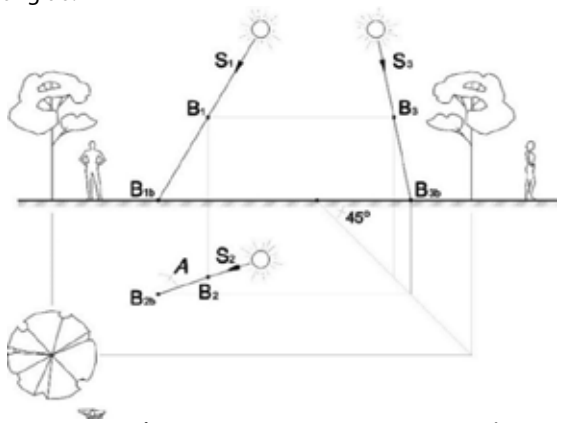
Trên cơ sở hướng chiếu đã xác định từ góc phương vị *A* và góc cao độ *h*, chiều dài bóng của một điểm hoặc vật thể có độ cao H có thể được xác định theo quan hệ lượng giác L= H/tan*h* trong đó: [4]

• H: độ cao điểm hoặc vật thể;

• L: chiều dài bóng.

Giá trị này được sử dụng làm cơ sở tham chiếu để kiểm chứng kết quả dựng bóng bằng hình học họa hình.

Trong dựng hình, bóng của mỗi điểm trên công trình được xác định bằng cách kẻ một đường thẳng qua điểm đó, song song với hướng tia sáng, cho đến khi giao với mặt phẳng nhận bóng (Hình 3 - cách xác định bóng của một điểm). Tập hợp các giao điểm của những điểm đặc trưng trên công trình tạo thành hình dạng và vị trí của bóng đổ.



Hình 3. Dựng bóng đổ theo dữ liệu Mặt Trời trên bộ ba hình chiếu thẳng góc. *(Nguồn: Tác giả)*

Trong nghiên cứu này, hướng dựng bóng không được giả định theo một phương chiếu quy ước (ví dụ 45°), mà được xác lập từ dữ liệu Mặt Trời tương ứng với ngày, giờ và tọa độ địa lý của công trình. Cụ thể, Hình 3 minh họa tia sáng và bóng đổ của điểm B được dựng dựa trên các dữ liệu:

• Ngày: Hạ chí 21/6/2014

• Vị trí: 16.20°B, 107.40°Đ

• Múi giờ: UTC+7, Thời gian: 09:40 am

• S(A, h): với A = 71.29° và h = 57.74°

Bộ dữ liệu thực nghiệm được trình bày riêng tại Mục 3.1.

Việc xác lập hướng chiếu theo dữ liệu Mặt trời là cơ sở để bóng dựng bằng hình học họa hình duy trì sự tương ứng với điều kiện chiếu sáng xác định, tạo nền tảng cho các bước chuyển đổi sang phối cảnh và trực quan hóa.

2.4. Quan hệ giữa bóng đổ thẳng góc và phối cảnh

Hình chiếu thẳng góc và hình phối cảnh là hai phương thức biểu diễn khác nhau của cùng một đối tượng không gian. Hình chiếu thẳng góc cho phép kiểm soát chính xác vị trí, kích thước và quan hệ hình học; trong khi phối cảnh chuyển các quan hệ không gian thành hình ảnh gần với cảm nhận thị giác người quan sát [2].

Trong bài toán nghiên cứu, hình chiếu thẳng góc được lựa chọn làm hệ hình học kiểm chứng, còn phối cảnh được sử dụng làm hệ hình trực quan hóa. Vì vậy, việc chuyển đổi không được thực hiện bằng cách thay đổi tùy ý hình dạng bóng, mà phải duy trì quan hệ giữa các điểm đặc trưng của công trình và bóng đổ. Có thể biểu diễn quan hệ này theo chuỗi: B → B1b, B2b, ... → Bb' (Hình 4). Trong đó:

• B : điểm đặc trưng trên công trình;

• B1b, B2b, ... : các điểm bóng tương ứng trên các hình chiếu thẳng góc;

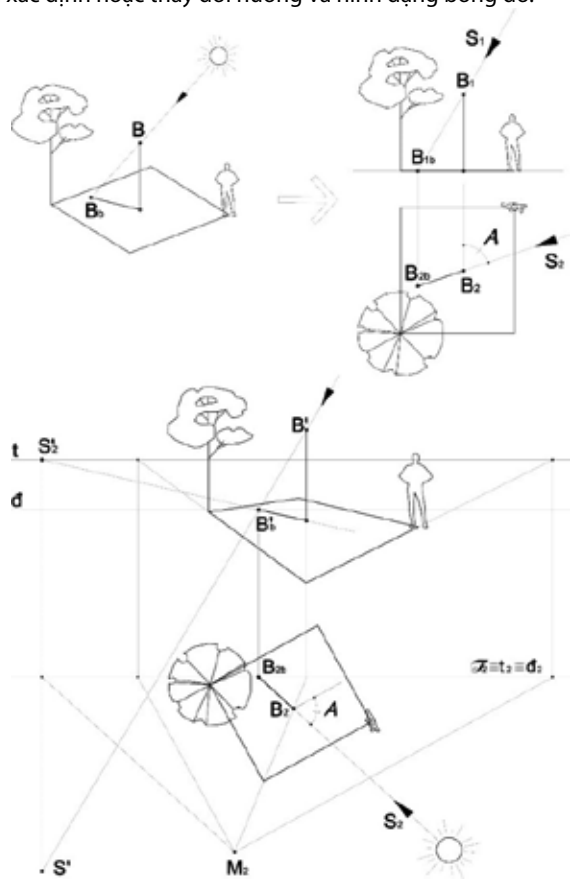
• Bb': biểu diễn phối cảnh của điểm bóng tương ứng.

Từ đó, điều kiện cơ bản của quá trình chuyển đổi là: B → B1b, B2b, ... ↔ Bb'.

Nghĩa là một điểm đặc trưng trên công trình phải duy trì được quan hệ tương ứng với điểm bóng của nó qua các hệ biểu diễn khác nhau. Tương tự, các cạnh và đường bao bóng đổ cũng phải được duy trì theo cùng nguyên tắc; trên phối cảnh, hướng và vị trí nguồn sáng có thể được xác định ngược từ quan hệ hình học của bóng đổ bằng phương pháp đổ bóng chủ động [2].

Cách tiếp cận này cho phép kiểm tra sự nhất quán hình học giữa các dạng biểu diễn.

Trong phạm vi nghiên cứu, nguyên tắc tương ứng được áp dụng cho phối cảnh một điểm tụ và hai điểm tụ, không xét phối cảnh ba điểm tụ. Kết quả phối cảnh đã được kiểm chứng được sử dụng làm cơ sở hình học đầu vào cho bước trực quan hóa bằng AI, thay vì để AI tự xác định hoặc thay đổi hướng và hình dạng bóng đổ.



Hình 4. Sự duy trì và thống nhất giữa bóng đổ thẳng góc và phối cảnh. *(Nguồn: Tác giả)*

2.5. Trực quan hóa kiến trúc bằng AI trên cơ sở mô hình hình học đã kiểm chứng

Sự phát triển của trí tuệ nhân tạo tạo sinh (Generative AI) đang mở rộng khả năng tạo hình và trực quan hóa trong thiết kế kiến trúc. Các mô hình sinh ảnh có khả năng chuyển đổi mô tả bằng ngôn ngữ, hình ảnh tham chiếu hoặc bản vẽ thiết kế thành hình ảnh kiến trúc, hỗ trợ quá trình hình thành và truyền đạt ý tưởng ngay từ những giai đoạn đầu của thiết kế [5]. AI có thể hỗ trợ thể hiện vật liệu, màu sắc, ánh sáng môi trường, chiều sâu không gian và chất lượng hình ảnh.

Tuy nhiên, khả năng tạo hình trực quan của AI không đồng nghĩa với việc bảo đảm tính chính xác của các quan hệ hình học và vật lý trong công trình. Đối với bài toán chiếu sáng, hình ảnh do AI tạo ra có thể phù hợp về mặt thị giác nhưng vẫn có khả năng sai lệch về hướng chiếu, vị trí hoặc hình dạng bóng đổ so với cơ sở hình học đã được xác lập. Vì vậy, trong nghiên cứu này, AI không được sử dụng để xác định hướng chiếu hoặc dựng bóng đổ, mà đóng vai trò là công cụ trực quan hóa trên cơ sở hình học đã được thiết lập và kiểm chứng.

2.6. Mô hình lý thuyết của nghiên cứu

Từ các cơ sở lý thuyết và phương pháp đã trình bày, nghiên cứu xây dựng quy trình chuyển đổi dữ liệu gồm năm bước (Hình 5).

Bước 1 - Xác định dữ liệu Mặt trời
Lựa chọn địa điểm, ngày và thời gian nghiên cứu; xác định góc phương vị *A* và góc cao độ *h*.

Bước 2 - Xác lập hướng chiếu
Chuyển *A* và *h* thành hướng chiếu từ Mặt trời tới công trình.

Bước 3 - Dựng bóng thẳng góc
Sử dụng tia sáng và mô hình hình học công trình để xác định các điểm bóng trên mặt nhận bóng.

Bước 4 - Chuyển sang phối cảnh
Chuyển các quan hệ hình học đã kiểm chứng sang hình phối cảnh, duy trì tương ứng giữa công trình và bóng đổ.

Bước 5 - Trực quan hóa bằng AI
Sử dụng mô hình hình học và phối cảnh đã kiểm chứng làm cơ sở để tạo hình ảnh kiến trúc trực quan bằng AI.

Hình 5. Sơ đồ quy trình chuyển đổi dữ liệu của nghiên cứu. *(Nguồn: Tác giả)*

Cấu trúc ba lớp của phương pháp

Toàn bộ quy trình được khái quát thành ba lớp có quan hệ liên tục như trình bày ở Bảng 1.

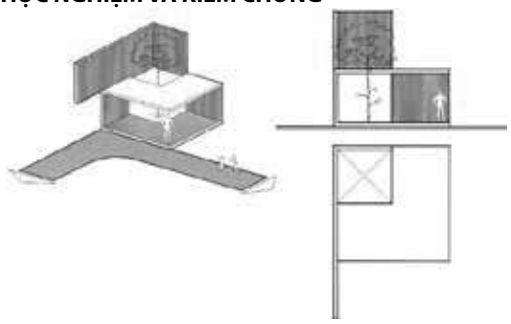
Bảng 1. Quy trình nghiên cứu được tổ chức thành ba lớp

Lớp	Nội dung	Vai trò
Lớp 1 – Dữ liệu	Mặt trời → *A*,*h* → hướng	Xác lập điều kiện chiếu sáng
Lớp 2 – Hình học	Hướng → bóng → phối cảnh	Xác định bóng và kiểm chứng
Lớp 3 - AI	Hình học đã kiểm chứng → AI →hình ảnh	Trực quan hóa

Ý nghĩa phương pháp

Trong nghiên cứu này, dẫn xuất hình học được hiểu là quá trình chuyển đổi dữ liệu thiên văn thành các quan hệ hình học xác định hướng chiếu và bóng đổ thông qua hình học họa hình, làm cơ sở cho biểu diễn phối cảnh và trực quan hóa bằng AI. Điểm cốt lõi của phương pháp là thiết lập và kiểm chứng cơ sở hình học trước khi trực quan hóa, qua đó duy trì sự nhất quán giữa dữ liệu Mặt trời, hướng chiếu, bóng đổ và các dạng biểu diễn kiến trúc. AI vì vậy được sử dụng như công cụ hỗ trợ trực quan hóa trên cơ sở hình học đã được kiểm chứng.

3. THỰC NGHIỆM VÀ KIỂM CHỨNG



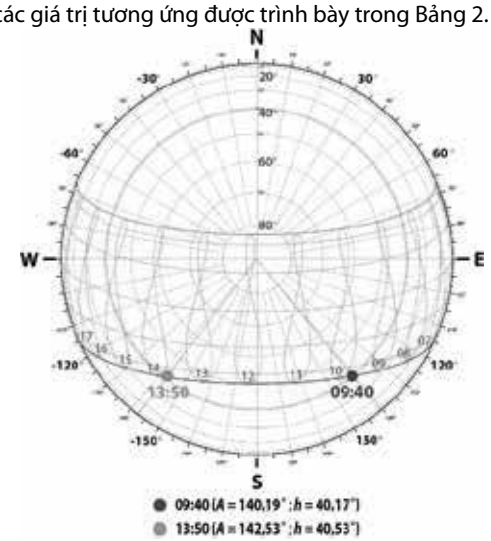
Hình 6. Mô hình thực nghiệm - Trạm trung chuyển tại TP. Huế. *(Nguồn: tác giả)*

Để kiểm chứng phương pháp đề xuất, một mô hình công trình có kích thước 6 m × 6 m × 6 m được lựa chọn làm đối tượng thực nghiệm. Mặc dù có hình học đơn giản, công trình bao gồm các thành phần như mái đua, tường đứng, các mảng đặc - rỗng, giếng trời và cây xanh (Hình 6). Mô hình này cho phép khảo sát mối quan hệ giữa dữ liệu Mặt trời, hướng chiếu, bóng đổ được dựng bằng Hình học họa hình và hình phối cảnh, qua đó kiểm chứng tính nhất quán của quy trình trước khi trực quan hóa bằng AI.

3.1. Dữ liệu mặt trời

Vị trí công trình được xác định tại 16,20° Bắc và 107,40° kinh Đông, thuộc múi giờ UTC+7. Mặt tiền chính của công trình hướng Nam. Hai thời điểm khảo sát được lựa chọn là 09:40 và 13:50, vào ngày Đông chí 22/12/2014.

Vị trí biểu kiến của Mặt Trời tại các thời điểm khảo sát được xác định thông qua góc phương vị *A* và góc cao độ *h*. Đường đi biểu kiến của Mặt Trời và vị trí tại các thời điểm khảo sát được thể hiện trên Hình 7; các giá trị tương ứng được trình bày trong Bảng 2.



Hình 7. Biểu đồ chuyển động biểu kiến Mặt Trời tại thời điểm khảo sát. *(Nguồn: [7], tác giả xử lý)*

Bảng 2. Thông số góc phương vị và cao độ của Mặt Trời

Thông số	Buổi sáng	Buổi chiều
Thời gian	09:40	13:50
Góc phương vị *A* (°)	140,19	142,53
Góc cao độ *h* (°)	40,17	40,53

3.2. Xác lập hướng tia sáng

Sau khi xác định vị trí Mặt Trời tại các thời điểm khảo sát, góc phương vị *A* và góc cao độ *h* được sử dụng để xác lập hướng chiếu trong hệ tọa độ công trình, với quy ước:

- X: hướng Đông;
- Y: hướng Bắc;
- Z: phương thẳng đứng.

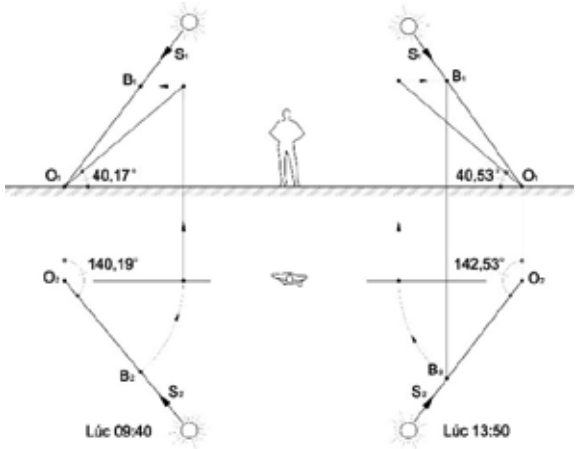
Vectơ đơn vị hướng Mặt Trời được xác định theo: S = (cos*h*sin*A*, cos*h*cos*A*, sin*h*).

Các giá trị S=(Sx, Sy, Sz) tại hai thời điểm khảo sát được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Thông số tọa độ điểm của phương chiếu

Thời điểm	S = (Sx, Sy, Sz)
09:40	S = (0,4892; -0,5867; 0,6452)
13:50	S = (-0,4 622; -0,6031; 0,6500)

Bên cạnh phương pháp biểu diễn bằng vectơ, hướng chiếu có thể được xác lập trực tiếp trên bản vẽ bằng hình học họa hình (phép quay hình), dựa trên góc phương vị và góc cao độ của Mặt Trời (Hình 8).



Hình 8. Cách xác định hướng chiếu trên bản vẽ bằng hình học họa hình. *(Nguồn: Tác giả)*

Phương pháp này cho phép biểu diễn hướng tia sáng trên hệ hình chiếu của công trình, làm cơ sở cho bước dựng bóng đổ.

3.3. Dựng bóng thẳng góc

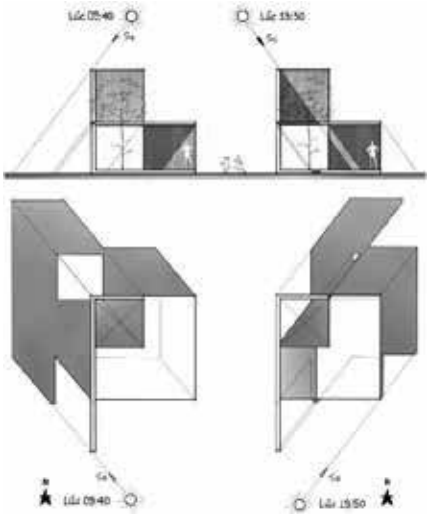
Với hướng chiếu đã xác lập, ở cấp độ định lượng, chiều dài bóng của một điểm có độ cao H được xác định từ góc cao độ của Mặt Trời *h* theo quan hệ: L= H/tan*h* trong đó L là chiều dài bóng và H là độ cao của điểm cần xác định bóng.

Kết quả tính toán tại hai thời điểm khảo sát được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Chiều dài bóng lý thuyết được xác định theo lượng giác

Thời điểm	Góc cao độ (*h*)	Chiều cao (H) (mm)	L= H/tan*h* (mm)
09:40	40,17°	6000	≈ 7100
13:50	40,53°	6000	≈ 7020

Ở cấp độ biểu diễn hình học, hướng chiếu đã xác lập được sử dụng để dựng bóng đổ trực tiếp trên hệ hình chiếu thẳng góc theo các nguyên tắc của hình học họa hình. Đường bao bóng của công trình được xác định trên mặt đứng và mặt bằng, qua đó thể hiện đồng thời vị trí, hướng và hình dạng của bóng đổ tại từng thời điểm khảo sát (Hình 9).

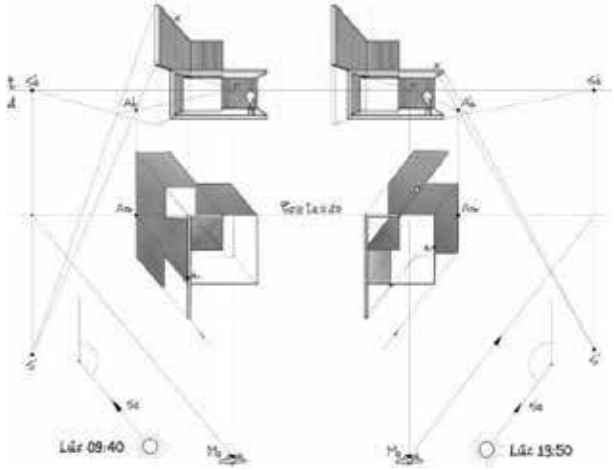


Hình 9. Kết quả dựng bóng đổ trên mặt đứng và mặt bằng theo cùng tỷ lệ với mô hình tại thời điểm khảo sát. *(Nguồn: Tác giả)*

Các giá trị chiều dài bóng tính theo quan hệ lượng giác được sử dụng như cơ sở kiểm tra định lượng cho kết quả dựng bóng bằng Hình học họa hình; đồng thời, vị trí và đường bao bóng trên mặt bằng và mặt đứng là cơ sở để chuyển sang biểu diễn phối cảnh ở bước tiếp theo.

3.4. Phối cảnh - bóng đã kiểm chứng

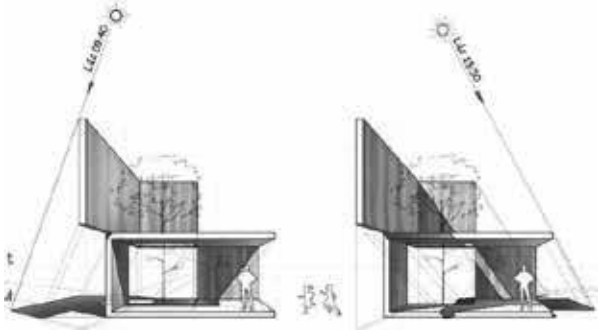
Sau khi bóng đổ được xác định và kiểm chứng trên hệ hình chiếu thẳng góc, kết quả được chuyển sang hình phối cảnh. (Hình10)



Hình 10. Cách xác định vị trí nguồn sáng và một điểm bóng đặc trưng trên công trình tại thời điểm khảo sát. *(Nguồn: Tác giả)*

Nguyên tắc quan trọng của bước này là không dựng lại bóng theo cảm nhận thị giác trên phối cảnh. Thay vào đó, nguồn sáng S(S', S'2) tại thời điểm khảo sát được biểu diễn chính xác trên mặt tranh, đồng thời kết hợp với một điểm bóng A'b thuộc đường đáy tranh để làm cơ sở cho việc chuyển toàn bộ kết quả bóng thẳng góc sang hình phối cảnh.

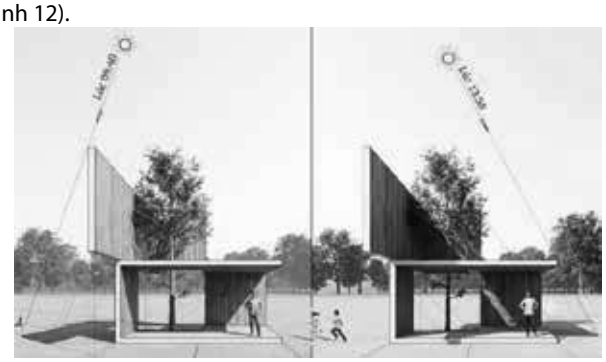
Nhờ đó, trong trường hợp này bóng phối cảnh không phải là một hình ảnh độc lập mà là một dạng biểu diễn khác của cùng một mô hình hình học. (Hình 11)



Hình 11. Các điểm bóng được xác định trong hệ hình chiếu thẳng góc và được chuyển đổi đồng thời với mô hình sang hệ phối cảnh. *(Nguồn: Tác giả)*

3.5. Trực quan hóa bằng AI

Phối cảnh sau khi được kiểm chứng về hình học và bóng đổ được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho quá trình trực quan hóa bằng AI (Hình 12).



Hình 12. Trực quan hóa mô hình phối cảnh đã kiểm chứng bằng AI
(Nguồn: Tác giả thực hiện với công cụ tạo ảnh AI Gemini)

Trong bước này, AI được sử dụng để tăng cường biểu đạt của mô hình, bao gồm vật liệu kiến trúc, cây xanh, bối cảnh, ánh sáng môi trường, độ chân thực và các yếu tố hình ảnh khác. AI không được sử dụng để xác định lại vị trí Mặt Trời, hướng chiếu hoặc hình dạng bóng đổ. Các quan hệ này đã được xác lập từ dữ liệu thiên văn và kiểm chứng bằng hình học họa hình ở các bước trước.

3.6. Đối chiếu và đánh giá kết quả

Kết quả thực nghiệm được đánh giá theo chuỗi chuyển đổi từ dữ liệu thiên văn đến hình ảnh kiến trúc. Việc kiểm chứng tập trung vào ba nhóm tiêu chí: (1) hướng chiếu; (2) chiều dài và hình dạng bóng đổ; (3) khả năng duy trì các quan hệ hình học khi trực quan hóa bằng AI.

Bảng 5. Độ nhất quán về hướng chiếu

Thời điểm	Dùng tọa độ S = (Sx, Sy, Sz)	Dùng phương pháp hình học	Đánh giá
09:40	S = (0,4892; -0,5867; 0,6452)	Phép xoay hình	Phù hợp
13:50	S = (-0,4 622; -0,6031; 0,6500)	Phép xoay hình	Phù hợp

Kết quả cho thấy hướng chiếu xác lập bằng phép xoay hình phù hợp với hướng chiếu được xác định từ vectơ S tại cả hai thời điểm khảo sát. Điều này cho phép sử dụng kết quả hình học làm cơ sở cho bước dựng bóng đổ.

Bảng 6. Độ nhất quán của chiều dài bóng đổ

Thời điểm	Góc cao độ (*h*)	Chiều cao (H) (mm)	Chiều dài bóng lý thuyết L= H/tan*h* (mm)	Chiều dài bóng từ dựng hình (mm)	Sai lệch (%)
09:40	40,17°	6000	≈ 7100	7108	0,11
13:50	40,53°	6000	≈ 7020	7017	0,04

Kết quả cho thấy chiều dài bóng xác định bằng hình học họa hình có sai lệch tương đối lần lượt 0,11% tại 09:40 và 0,04% tại 13:50 so với giá trị tính toán theo quan hệ lượng giác. Sai lệch nhỏ có thể xuất phát từ thao tác dựng hình, độ dày nét vẽ, xác định giao điểm, đo đạc trên bản vẽ và việc làm tròn các giá trị góc.

Trong phạm vi nghiên cứu, các sai lệch này được xem là sai số của quá trình dựng và đo trên bản vẽ, không làm thay đổi đáng kể quan hệ hình học của bóng đổ. Do đó, kết quả dựng hình được xem là phù hợp với cơ sở tính toán lý thuyết.

Đối với hình ảnh AI, việc đánh giá được thực hiện theo tiêu chí duy trì các quan hệ hình học đã được kiểm chứng ở các bước trước, thay vì chỉ dựa trên chất lượng hình ảnh. AI được sử dụng sau khi hướng chiếu và bóng đổ đã được xác lập bằng dữ liệu Mặt trời và hình học họa hình. Vì vậy, việc đánh giá tập trung vào khả năng duy trì hướng chiếu, hình dạng bóng đổ và quan hệ giữa công trình với bóng trong hình ảnh đầu ra.

Bảng 7. Khả năng duy trì hình học khi trực quan hóa bằng AI

Tiêu chí kiểm chứng	09:40	13:50	Đánh giá
Duy trì hướng chiếu đã xác định	✓	✓	Duy trì
Giữ nguyên hình dạng cơ bản và tỷ lệ của công trình	✓	✓	Duy trì
Duy trì quan hệ tương ứng của công trình và bóng	✓	✓	Duy trì
Không tạo thêm bóng có hướng trái với dữ liệu Mặt trời	✓	✓	Đạt yêu cầu
Nâng cao mức độ trực quan về vật liệu, cây xanh, bối cảnh và ánh sáng môi trường	✓	✓	Đạt yêu cầu

Kết quả cho thấy hình ảnh tạo sinh duy trì được các quan hệ hình học cơ bản đã được xác lập trước đó, đồng thời tăng cường khả năng biểu đạt về vật liệu, bối cảnh và ánh sáng môi trường. Trong phạm vi nghiên cứu, AI được xem là công cụ trực quan hóa trên cơ sở hình học đã kiểm chứng, không thay thế quá trình xác lập hướng chiếu và dựng bóng đổ.

Như vậy, quy trình đề xuất cho phép phân biệt các nguồn sai lệch theo từng công đoạn: sai lệch từ dữ liệu và tính toán, sai số trong quá trình dựng và đo hình học, và sai lệch trực quan trong quá trình tạo ảnh bằng AI. Cách tiếp cận này tạo cơ sở kiểm soát kết quả theo từng lớp dữ liệu, đồng thời phân biệt rõ độ chính xác hình học với mức độ chân thực của hình ảnh trực quan.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng một phương pháp dẫn xuất hình học kết nối dữ liệu thiên văn với biểu diễn và trực quan hóa hiện tượng chiếu sáng trong kiến trúc bằng AI. hình học họa hình được sử dụng để xác lập và kiểm chứng quan hệ giữa hướng chiếu, công trình và bóng đổ, tạo cơ sở hình học trước khi chuyển sang phối cảnh và trực quan hóa.

Kết quả thực nghiệm cho thấy sự tương ứng giữa dữ liệu Mặt trời, hướng chiếu, vị trí và hình dạng bóng đổ được duy trì qua các dạng biểu diễn, góp phần kiểm soát tính nhất quán của hình ảnh tạo sinh. Theo đó, dẫn xuất hình học có thể đóng vai trò như một lớp trung gian giữa dữ liệu thiên văn và trực quan hóa kiến trúc, trong đó AI hỗ trợ biểu đạt trên cơ sở hình học đã kiểm chứng.

Phương pháp góp phần kết nối dữ liệu thiên văn, hình học họa hình và trực quan hóa AI trong nghiên cứu và đào tạo kiến trúc. Quy trình này có thể được mở rộng cho các bài toán mô phỏng và biểu diễn chiếu sáng kiến trúc có yêu cầu kiểm soát quan hệ hình học.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Đình Điện, Đỗ Mạnh Môn. Hình học họa hình tập 1. NXB. Giáo dục, 2018.

[2] Nguyễn Ngọc Thi. Lý thuyết và Ứng dụng hình học họa hình chuyên ngành Thiết kế Kiến trúc - Nội thất. NXB. Xây dựng, 2025.

[3] Ward, G. J. The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System. Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), pp. 459-472, 1994.

[4] Phạm Ngọc Đăng, Phạm Hải Hà. Nhiệt và Khí hậu Kiến trúc. NXB. Xây dựng, 2002.

[5] Lee, J. K., Yoo, Y., & Cha, S. H. Generative early architectural visualizations: Incorporating architect's style-trained models, Journal of Computational Design and Engineering, vol. 11, no. 5, tr. 40-59, 2024, doi: 10.1093/jcde/qwae065.

[6] Ching, Francis D. K. Bản vẽ Kiến trúc (Architectural Graphics). Phiên bản thứ 6, NXB. Dân trí, 2023.

[7] Marsh. Andrew J. 2D Sun-Path. Andrew Marsh - Architectural Environmental Analysis, 2014.

■Ngày nhận bài: 03/7/2026 ■Ngày sửa bài: 30/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/8/2026

Phân tích tĩnh cho tấm composite nhiều lớp dựa trên hàm biến dạng cắt bậc ba Chebyshev sử dụng IGA

Static analysis of laminated composite plates using a chebyshev-based third-order shear deformation function and isogeometric analysis

> **HUỲNH BÁ HỌC[1], NGUYỄN ĐỨC PHÁT[2], NGUYỄN THỊ BÍCH LIỄU[1,*]**
[1]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP.HCM
[2]Khoa Giao thông và Năng lượng, Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP.HCM
[*]Email: lieuntb@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một hàm biến dạng cắt bậc cao được xây dựng từ đa thức Chebyshev bậc ba kết hợp với phân tích đẳng hình học (IGA- Chebyshev) cho phân tích tĩnh tấm composite nhiều lớp. Hàm Chebyshev được lựa chọn nhờ khả năng mô tả linh hoạt sự phân bố biến dạng cắt theo chiều dày, đồng thời tận dụng các đặc tính trực giao và khả năng xấp xỉ tốt của đa thức Chebyshev, qua đó nâng cao độ chính xác của mô hình biến dạng cắt mà không cần sử dụng hệ số hiệu chỉnh cắt. Hàm cơ sở NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) trong IGA cho phép xây dựng trường chuyển vị có độ liên tục cao và mô tả chính xác hình học cũng như chuyển vị và ứng suất của tấm composite nhiều lớp. Kết quả số được so sánh với các hàm bậc cao khác và nghiệm chính xác 3D, cho thấy phương pháp IGA- Chebyshev đạt độ chính xác cao, hội tụ tốt và có khả năng mô tả hiệu quả đáp ứng tĩnh của tấm composite nhiều lớp.

Từ khóa: Đa thức Chebyshev; IGA; hàm cơ sở NURBS; HSDT; phân tích tĩnh; tấm composite nhiều lớp.

ABSTRACT

This study proposes a higher-order shear deformation function based on the third-order Chebyshev polynomial and integrated with isogeometric analysis (IGA- Chebyshev) for the static analysis of laminated composite plates. The Chebyshev function is employed owing to its ability to flexibly describe the through-thickness distribution of shear deformation, while exploiting the orthogonality and strong approximation properties of Chebyshev polynomials, thereby enhancing the accuracy of the shear deformation model without requiring a shear correction factor. The NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) basis functions in IGA enable the construction of highly continuous displacement fields and provide an accurate representation of the geometry, as well as the displacement and stress responses of laminated composite plates. Numerical results are compared with available reference solutions and existing approaches, demonstrating that the proposed IGA- Chebyshev method provides high accuracy, good convergence and an effective capability for predicting the static response of laminated composite plates.

Keywords: Chebyshev polynomial; IGA; NURBS basis functions; HSDT; bending behavior analysis; laminated composite.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trải qua nhiều đột phá trong khoa học và công nghệ vật liệu, vật liệu composite ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ tính linh hoạt và khả năng tối ưu các đặc tính cơ học. Trong đó, tấm composite nhiều lớp đang nhận được sự quan tâm và nghiên cứu nhờ khả năng thiết kế và điều chỉnh các đặc tính cơ học thông qua sự sắp xếp, định hướng và cấu hình khác nhau của các lớp vật liệu. Đặc tính này giúp tấm composite nhiều lớp đáp ứng hiệu quả các yêu cầu về độ bền, độ cứng và trọng lượng nhẹ trong nhiều ứng dụng kỹ thuật tiên tiến.

Lý thuyết tấm cổ điển (CLPT) dựa trên giả thuyết Kirchhoff, bỏ qua biến dạng cắt nên phù hợp với tấm mỏng nhưng kém chính xác khi chiều dày tăng. Vì vậy, lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất (FSDT) của Mindlin được phát triển để xét biến dạng cắt ngang nhưng cần hệ số hiệu chỉnh cắt [1]. Các lý thuyết biến dạng cắt bậc cao (HSDT) tiếp tục được phát triển nhằm loại bỏ hệ số này, đồng thời mô tả chính xác sự phân bố biến dạng cắt theo chiều dày và thỏa mãn điều kiện ứng suất cắt bằng không tại hai bề mặt trên cùng và dưới cùng của tấm [2]. Song song đó, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng lưới phần tử và các hàm nội suy, trong khi phương pháp phân

tích đẳng hình học (IGA) sử dụng điểm điều khiển và các hàm cơ sở NURBS [3]. Khác với FEM truyền thống, IGA [3] trực tiếp sử dụng các hàm cơ sở NURBS vốn được dùng để biểu diễn hình học CAD cho cả quá trình mô hình hóa hình học và xấp xỉ trường vật lý, qua đó đảm bảo tính nhất quán giữa mô hình hình học và mô hình phân tích. Đặc biệt, NURBS có khả năng duy trì tính liên tục cao giữa các miền tham số, cho phép xây dựng trường chuyển vị trơn với các đạo hàm bậc cao, đồng thời giảm đáng kể sai số hình học trong quá trình phân tích. Nhờ những ưu điểm này, IGA ngày càng được ứng dụng hiệu quả trong phân tích kết cấu tấm và vỏ, đặc biệt đối với các lý thuyết biến dạng bậc cao yêu cầu tính liên tục cao của trường chuyển vị.

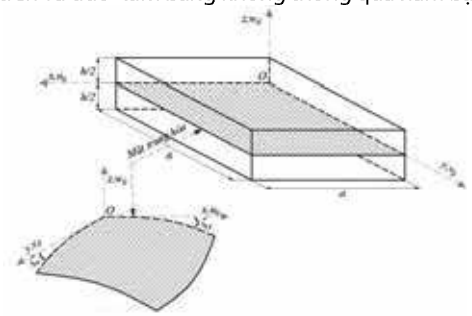
Trong nghiên cứu này, hàm Chebyshev được đề xuất dựa trên hệ đa thức thiết lập từ hàm cosin, với ưu điểm về tính trực giao, khả năng xấp xỉ tốt và hội tụ nhanh kết hợp với phương pháp phân tích đẳng hình học góp phần nâng cao độ chính xác và hiệu quả tính toán [4]. Các kết quả số được so sánh với các hàm bậc cao khác và nghiệm chính xác 3D, qua đó cho thấy phương pháp đề xuất IGA-Chebyshev là một công cụ phân tích hiệu quả cho các lớp bài toán tấm vỏ [5].

2. LÝ THUYẾT BIẾN DẠNG CẮT BẬC CAO DỰA TRÊN ĐA THỨC CHEBYSHEV BẬC BA

Trường chuyển vị tại một điểm bất kì lần lượt theo hệ trục tọa độ *x*, *y*, *z* cho một tấm composite nhiều lớp được mô tả như sau [2]:

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= u_0(x,y) - zw_{,x} + n(z)\zeta_x(x,y) \\ v(x,y,z) &= v_0(x,y) - zw_{,y} + n(z)\zeta_y(x,y); \quad \left(\frac{-h}{2} \le z \le \frac{h}{2}\right) \\ w(x,y,z) &= w_0(x,y) \end{aligned} \tag{1}$$

Trong đó, u_0, v_0, w_0 và $\zeta = (\zeta_x;\zeta_y)^T$ lần lượt biểu diễn các thành phần chuyển vị theo các phương *x*, *y*, *z* và các góc quay trong các mặt phẳng *x-z* và *y-z* tương ứng như Hình 1. Ứng suất cắt được biểu diễn một cách liên tục theo chiều dày tấm và thỏa mãn được điều kiện biên trên và dưới tấm bằng không thông qua hàm bậc cao *n*(*z*).

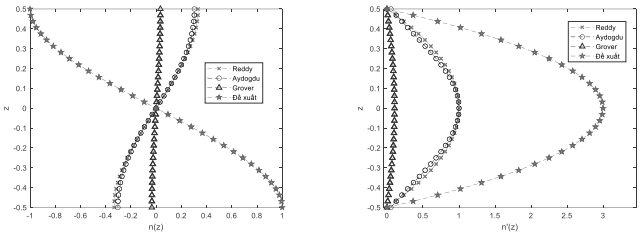


Hình 1. Hình học tấm và trường chuyển vị theo hệ trục tọa độ *x*, *y*, *z*

Các hàm bậc cao tham khảo và hàm Chebyshev bậc ba đề xuất được áp dụng cho bài toán phân tích ứng xử uốn cho tấm composite nhiều lớp được trình bày trong Bảng 1. Hình 2 cho thấy được sự mô tả một số hàm tham khảo và đạo hàm của chúng theo bề dày tấm.

Bảng 1. Hàm biến dạng cắt bậc cao và đạo hàm tương ứng

Tác giả	*n*(*z*)	*n'*(*z*)
Reddy [2]	$z - 4z^3/3h^2$	$1 - 4(z/h)^2$
Aydogdu [6]	$3^{-2(z/h)^2/\ln(3)}z$	$e^{-2z^2/h^2}\left(1 - 4z^2/h^2\right)$
Grover [7]	$h\sinh^{-1}(z/h) - 2z/\sqrt{5}$	$1/\sqrt{1+(z/h)^2} - 2/\sqrt{5}$
Đề xuất (Chebyshev)	$\cos\left(3\cos^{-1}(z/h)\right)$	$3\left(4z^2/h^2 - 1\right)/h$



(a) (b)

Hình 2. Một số hàm bậc cao (a) và đạo hàm tương ứng (b)

Mối quan hệ giữa các biến dạng Cauchy với các trường chuyển vị như sau [2]:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_p &= \{\varepsilon_{xx}\ \varepsilon_{yy}\ \gamma_{xy}\}^T = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + z\boldsymbol{\varepsilon}_1 + n(z)\boldsymbol{\varepsilon}_2; \\ \boldsymbol{\gamma} &= \{\gamma_{xz}\ \gamma_{yz}\}^T = n'(z)\boldsymbol{\varepsilon}_s \end{aligned} \tag{2}$$

Trong đó:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \begin{Bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,y} \\ v_{0,x} + u_{0,y} \end{Bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \begin{Bmatrix} -w_{,xx} \\ -w_{,yy} \\ -w_{,xy} \end{Bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \begin{Bmatrix} \zeta_{x,x} \\ \zeta_{y,y} \\ \zeta_{y,x} + \zeta_{x,y} \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_s = \begin{Bmatrix} \zeta_x \\ \zeta_y \end{Bmatrix} \tag{3}$$

Với mỗi lớp thứ *t* vật liệu được xem là trực hướng, các thành phần ứng suất cho từng lớp theo hệ trục tọa độ cục bộ được xác định như sau [8]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1^t \\ \sigma_2^t \\ \tau_{12}^t \\ \tau_{13}^t \\ \tau_{23}^t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} \end{bmatrix}^t \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^t \\ \varepsilon_2^t \\ \gamma_{12}^t \\ \gamma_{13}^t \\ \gamma_{23}^t \end{Bmatrix} \tag{4}$$

Trong đó, các thành phần ma trận độ cứng suy giảm cho từng lớp thứ *t* được xác định như sau:

$$\begin{aligned} &Q_{11}^t = \frac{E_1^t}{1-\nu_{12}^t\nu_{21}^t}; Q_{12}^t = \frac{\nu_{12}^t E_2^t}{1-\nu_{12}^t\nu_{21}^t}; Q_{22}^t = \frac{E_2^k}{1-\nu_{12}^t\nu_{21}^t}; \\ &Q_{33}^t = G_{12}^t; Q_{55}^t = G_{13}^t; Q_{44}^t = G_{23}^t \end{aligned} \tag{5}$$

Đối với lớp thứ *t*, các thành phần đặc trưng vật liệu theo hệ trục vật liệu 1, 2 và 3 được xác định thông qua các hệ số mô-đun Young, mô-đun cắt và hệ số Poisson.

Từ các thành phần ứng suất của hệ trục cục bộ, các thành phần ứng suất theo hệ trục toàn cục được thiết lập theo các ma trận cosin chỉ hướng như sau [9]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1^t \\ \sigma_2^t \\ \tau_{12}^t \\ \tau_{13}^t \\ \tau_{23}^t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{55} & \bar{Q}_{54} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{44} \end{bmatrix}^t \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^t \\ \varepsilon_2^t \\ \gamma_{12}^t \\ \gamma_{13}^t \\ \gamma_{23}^t \end{Bmatrix} \tag{6}$$

Trong đó, ma trận độ cứng suy giảm $\overline{\mathbf{Q}}_{ij}$ từ hệ trục cục bộ của tấm được đưa về hệ trục toàn cục.

Đồng thời, theo định luật Hooke xây dựng được mối quan hệ giữa các thành phần ứng suất và biến dạng thông qua các thành phần ma trận độ cứng hệ tọa độ toàn cục như sau:

$$\boldsymbol{\sigma}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\sigma}_p\\ \boldsymbol{\tau}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{D}^* & 0\\ 0 & \mathbf{D}^s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varepsilon}_p\\ \boldsymbol{\gamma}\end{bmatrix} \tag{7}$$

Trong đó, $\mathbf{D}^*$ được định nghĩa là ma trận độ cứng đàn hồi được xác định như sau:

$$\mathbf{D}^*=\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{E}\\ \mathbf{B} & \mathbf{D} & \mathbf{F}\\ \mathbf{E} & \mathbf{F} & \mathbf{H}\end{bmatrix} \tag{8}$$

Theo phương trình (8), các thành phần độ cứng được thiết lập thông qua các thành phần độ cứng suy giảm hệ trục toàn cục như sau [10]:

$$\begin{gathered}A_{ij},B_{ij},D_{ij},E_{ij},F_{ij},H_{ij}=\int_{-h/2}^{h/2}(1,z,z^2,n(z),zn(z),n^2(z))\bar{Q}_{ij}\mathrm{d}z\\ i,j=1,2,6\\ D_{ij}^s=\int_{-h/2}^{h/2}\left[(n'(z))^2\right]\bar{Q}_{ij}\mathrm{d}z \quad i,j=4,5\end{gathered} \tag{9}$$

Dạng yếu Galerkin được thiết lập như sau [11]:

$$\int_\Omega \delta\boldsymbol{\varepsilon}_p^T\mathbf{D}^*\boldsymbol{\varepsilon}_p\mathrm{d}\Omega+\int_\Omega \delta\boldsymbol{\gamma}^T\mathbf{D}^s\boldsymbol{\gamma}\mathrm{d}\Omega=\int_\Omega \delta w q_0\mathrm{d}\Omega \tag{10}$$

3. XẤP XỈ DỰA TRÊN HÀM CƠ SỞ NURBS

Trường chuyển vị tại một điểm bất kì được xấp xỉ như sau [12]:

$$\mathbf{x}^h(\xi,\eta)=\sum_{U=1}^{m\times n}T_U(\xi,\eta)\mathbf{P}_U;\quad \mathbf{u}^h(\xi,\eta)=\sum_{U=1}^{m\times n}T_U(\xi,\eta)\mathbf{q}_U \tag{11}$$

Với $n\times m$ là tổng số hàm cơ sở và $\mathbf{x}^T=\begin{pmatrix}x & y\end{pmatrix}$ là véc-tơ tọa độ vật lý. Trong đó, hàm cơ sở NURBS và véc-tơ bậc tự do tại điểm điều khiển U lần lượt là $T_U(\xi,\eta)$ và $\mathbf{q}_U=\begin{bmatrix}u_{0U} & v_{0U} & w_{0U} & \zeta_{xU} & \zeta_{yU}\end{bmatrix}^T$.

Từ phương trình (11) thay vào phương trình (2), các trường biến dạng được xác định như sau [12]:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\varepsilon}_p & \boldsymbol{\gamma}\end{bmatrix}^T=\sum_{U=1}^{m\times n}\begin{bmatrix}\mathbf{B}_U^m & \mathbf{B}_U^{b1} & \mathbf{B}_U^{b2} & \mathbf{B}_U^s\end{bmatrix}^T\mathbf{q}_U \tag{12}$$

Trong đó:

$$\begin{gathered}\mathbf{B}_U^m=\begin{bmatrix}T_{U,x} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & T_{U,y} & 0 & 0 & 0\\ T_{U,y} & T_{U,x} & 0 & 0 & 0\end{bmatrix};\mathbf{B}_U^{b1}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -T_{U,xx} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -T_{U,yy} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -2T_{U,xy} & 0 & 0\end{bmatrix};\\ \mathbf{B}_U^{b2}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & T_{U,x} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{U,y}\\ 0 & 0 & 0 & T_{U,y} & T_{U,x}\end{bmatrix};\mathbf{B}_U^s=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & T_U & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_U\end{bmatrix}.\end{gathered} \tag{13}$$

Công thức phân tích tĩnh thu được từ việc thay phương trình (12), quan hệ giữa các biến dạng với các véc-tơ bậc tự do và ma trận độ cứng **B** vào phương trình (10) ta thu được như sau [12]:

$$\mathbf{Kq}=\mathbf{f} \tag{14}$$

Tại đây, ma trận độ cứng toàn phần **K** được thiết lập như sau:

$$\mathbf{K}=\int_\Omega\left[\begin{Bmatrix}\mathbf{B}^m\\ \mathbf{B}^{b1}\\ \mathbf{B}^{b2}\end{Bmatrix}^T\begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{E}\\ \mathbf{B} & \mathbf{D} & \mathbf{F}\\ \mathbf{E} & \mathbf{F} & \mathbf{H}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\mathbf{B}^m\\ \mathbf{B}^{b1}\\ \mathbf{B}^{b2}\end{Bmatrix}+(\mathbf{B}^s)^T\mathbf{D}^s\mathbf{B}^s\right]\mathrm{d}\Omega \tag{15}$$

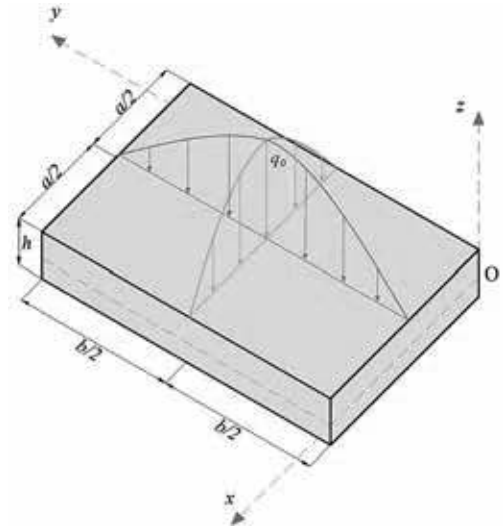
Trong đó, ma trận véc-tơ lực **f** được xác định như sau: $\mathbf{f}=\int_\Omega q_0\mathbf{R}_0\mathrm{d}\Omega$, trong đó: $\mathbf{R}_0=\begin{bmatrix}0 & 0 & T_U & 0 & 0\end{bmatrix}$

4. KẾT QUẢ SỐ

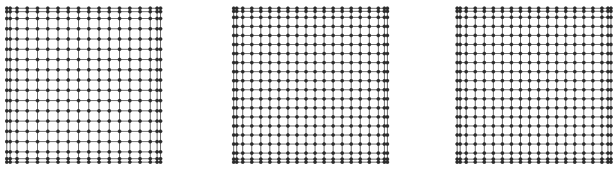
Trước tiên, nhằm kiểm chứng tính hội tụ và xác định cấu hình tính toán tối ưu cho mô hình đề xuất, ảnh hưởng của bậc hàm cơ sở và mật độ lưới được khảo sát một cách có hệ thống. Một tấm vuông bốn lớp $[0^0/90^0/90^0/0^0]$ với các cạnh được tựa đơn hoàn toàn (SSSS), chịu tải phân bố dạng hình sin, được lựa chọn làm mô hình kiểm chứng. Ba mức mật độ lưới, gồm 15 × 15, 17 × 17 và 19 × 19 nút, được lần lượt xem xét đối với các hàm cơ sở bậc 3 và bậc 4. Kết quả thu được được trình bày trong Bảng 2. Có thể thấy rằng, đối với hàm cơ sở bậc 3, nghiệm thu được với lưới 17 × 17 đã đạt trạng thái gần hội tụ; trong khi đó, hàm cơ sở bậc 4 cần đến lưới 19 × 19 mới cho kết quả tương tự. Sự thay đổi của kết quả khi tiếp tục tinh mịn lưới là không đáng kể, cho thấy độ chính xác của nghiệm đã được đảm bảo. Mặc dù hàm cơ sở bậc 4 có khả năng cải thiện độ chính xác xấp xỉ, việc sử dụng hàm bậc cao đồng thời làm gia tăng số lượng bậc tự do và chi phí tính toán, trong khi mức độ cải thiện về kết quả là không đáng kể. Do đó, lưới 17 × 17 kết hợp với hàm cơ sở bậc 3 được lựa chọn cho các phân tích tiếp theo, nhằm đạt được sự cân bằng hợp lý giữa độ chính xác, khả năng hội tụ và hiệu quả tính toán.

Các thành phần ứng ứng suất và chuyển vị không thứ nguyên được tính như sau:

$$\begin{gathered}\bar{w}=(100E_2h^3)w(\frac{a}{2},\frac{b}{2},0)/q_0a^4;\ \bar{\sigma}_{xx}=\frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{xx}(\frac{a}{2},\frac{b}{2},\frac{h}{2});\\ \bar{\sigma}_{yy}=\frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{yy}(\frac{a}{2},\frac{b}{2},\frac{h}{4})\\ \bar{\sigma}_{xy}=\frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{xy}(0,0,\frac{h}{2});\ \bar{\sigma}_{xz}=\frac{h}{q_0a}\sigma_{xz}(0,\frac{a}{2},0);\\ \bar{\sigma}_{yz}=\frac{h}{q_0a}\sigma_{yz}(\frac{a}{2},0,0)\end{gathered} \tag{16}$$



Hình 3. Mô hình tấm composite nhiều lớp chịu tải phân bố hình sin.



(a) (b) (c)

Hình 4. Lưới điều khiển tấm composite nhiều lớp (a) 15×15, (b) 17×17 và (c) 19×19

Bảng 2. Khảo sát hội tụ nghiệm theo bậc hàm cơ sở và mật độ lưới điều khiển của tấm vuông bốn lớp $[0^0/90^0/90^0/0^0]$ chịu tải phân bố dạng hình sin (*a/h* = 4)

Kết quả	Cấu hình lưới - bậc									Nghiệm chính xác 3D [5]
	p = 2			*p* = 3			*p* = 4			
	15 x 15	17 x 17	19 x 19	15 x 15	17 x 17	19 x 19	15 x 15	17 x 17	19 x 19	
$\bar{w}$	1,8633 (4,64%)	1,8693 (4,33%)	1,8739 (4,09%)	1,8936 (3,09%)	1,8936 (3,09%)	1,8936 (3,09%)	1,8936 (3,09%)	1,8936 (3,09%)	1,8936 (3,09%)	**1,9540**
$\bar{\sigma}_{xx}$	0,6498 (9,75%)	0,6540 (9,16%)	0,6570 (8,75%)	0,6607 (8,23%)	0,6617 (8,09%)	0,6624 (8,00%)	0,6651 (7,62%)	0,6651 (7,62%)	0,6651 (7,62%)	**0,7200**
$\bar{\sigma}_{yy}$	0,6258 (5,61%)	0,6269 (5,44%)	0,6278 (5,30%)	0,6300 (4,97%)	0,6305 (4,90%)	0,6308 (4,85%)	0,6322 (4,64%)	0,6322 (4,64%)	0,6322 (4,64%)	**0,6630**
$\bar{\sigma}_{xz}$	0,2266 (3,47%)	0,2241 (2,32%)	0,2221 (1,41%)	0,2064 (5,75%)	0,2063 (5,79%)	0,2063 (5,79%)	0,2063 (5,79%)	0,2063 (5,79%)	0,2063 (5,79%)	**0,2190**
$\bar{\sigma}_{yz}$	0,2580 (11,64%)	0,2559 (12,36%)	0,2543 (12,91%)	0,2389 (18,18%)	0,2389 (18,18%)	0,2389 (18,18%)	0,2389 (18,18%)	0,2389 (18,18%)	0,2389 (18,18%)	**0,2920**
$\bar{\sigma}_{xy}$	0,0474 (1,49%)	0,0469 (0,42%)	0,0465 (0,42%)	0,0440 (5,78%)	0,0440 (5,78%)	0,0440 (5,78%)	0,0440 (5,78%)	0,0440 (5,78%)	0,0440 (5,78%)	**0,0467**

Tiếp theo, chúng tôi khảo sát tấm chữ nhật 3 lớp $[0^0/90^0/0^0]$ (*a/b*=3) chịu tải hình sin qua các tỷ số *a/h* từ 4 đến 100 cùng với điều kiện biên SSSS. Các thành phần ứng suất và chuyển vị không thứ nguyên được xác định như sau:

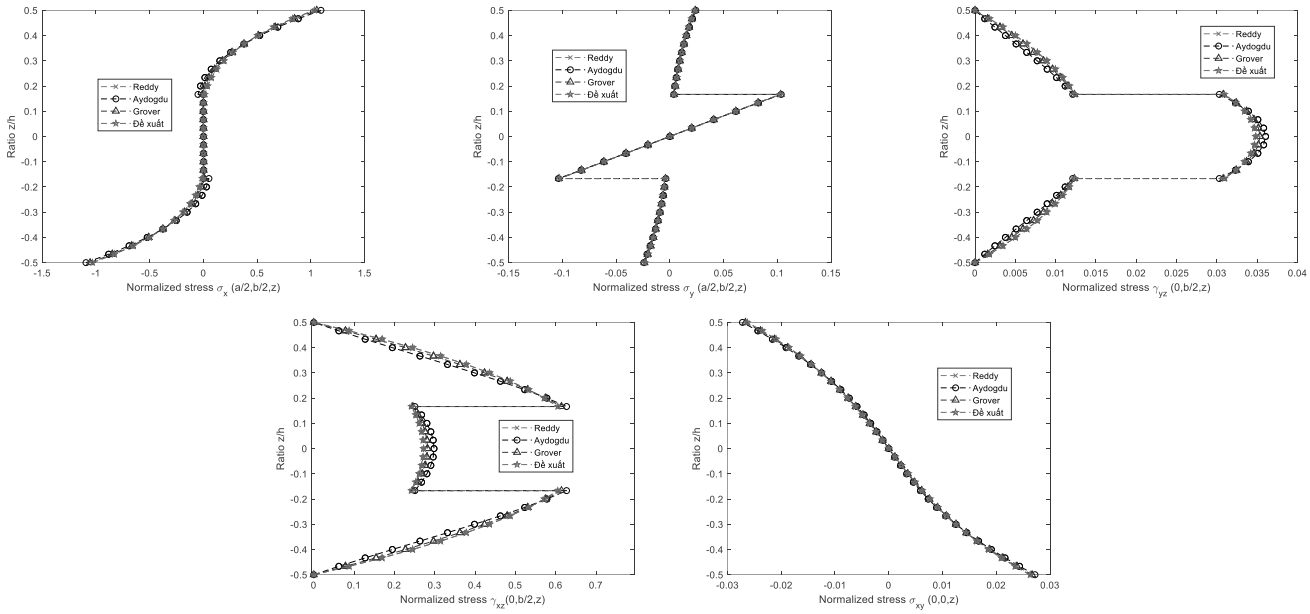
$$\bar{w} = (100E_2h^3)w(\frac{a}{2},\frac{b}{2},0)/q_0a^4;\ \bar{\sigma}_{xx} = \frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{xx}(\frac{a}{2},\frac{b}{2},\frac{h}{2});$$
$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{yy}(\frac{a}{2},\frac{b}{2},\frac{h}{6})$$
$$\bar{\sigma}_{xy} = \frac{h^2}{q_0a^2}\sigma_{xy}(0,0,\frac{h}{2});\ \bar{\sigma}_{xz} = \frac{h}{q_0a}\sigma_{xz}(0,\frac{b}{2},0); \quad (17)$$
$$\bar{\sigma}_{yz} = \frac{h}{q_0a}\sigma_{yz}(\frac{a}{2},0,0)$$

Bảng 3. Chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên của tấm chữ nhật 3 lớp $[0^0/90^0/0^0]$ chịu tải phân bố hình sin

a/h	Tác giả	$\bar{w}$	$\bar{\sigma}_{xx}$	$\bar{\sigma}_{yy}$	$\bar{\sigma}_{xz}$	$\bar{\sigma}_{yz}$	$\bar{\sigma}_{xy}$
4	IGA - Reddy [2]	2,6410	1,0311	0,1025	0,2723	0,0348	0,0263
	IGA - Aydogdu [6]	2,6837	1,0926	0,1036	0,2982	0,0360	0,0272
	IGA - Grover [7]	2,6606	1,0541	0,1031	0,2821	0,0353	0,0266
	IGA - Chebyshev	2,6410	1,0311	0,1025	0,2723	0,0348	0,0263
	Nghiệm chính xác 3D [5]	**2,8200**	**1,1000**	**0,1190**	**0,3870**	**0,0334**	**0,0281**
10	IGA - Reddy [2]	0,8621	0,6908	0,0397	0,2859	0,0169	0,0115
	IGA - Aydogdu [6]	0,8767	0,7027	0,0402	0,3194	0,0174	0,0117
	IGA - Grover [7]	0,8679	0,6951	0,0399	0,2981	0,0171	0,0115
	IGA - Chebyshev	0,8621	0,6908	0,0397	0,2859	0,0169	0,0115
	Nghiệm chính xác 3D [5]	**0,9190**	**0,7250**	**0,0435**	**0,4200**	**0,0152**	**0,0123**
20	IGA - Reddy [2]	0,5937	0,6396	0,0288	0,2880	0,0139	0,0091
	IGA - Aydogdu [6]	0,5976	0,6426	0,0290	0,3227	0,0142	0,0091
	IGA - Grover [7]	0,5952	0,6407	0,0289	0,3006	0,0140	0,0091
	IGA - Chebyshev	0,5937	0,6396	0,0288	0,2880	0,0139	0,0091
	Nghiệm chính xác 3D [5]	**0,6100**	**0,6500**	**0,0299**	**0,4340**	**0,0119**	**0,0093**
100	IGA - Reddy [2]	0,5070	0,6230	0,0252	0,2887	0,0129	0,0083
	IGA - Aydogdu [6]	0,5071	0,6231	0,0252	0,3238	0,0132	0,0083
	IGA - Grover [7]	0,5070	0,6231	0,0252	0,3014	0,0130	0,0083
	IGA - Chebyshev	0,5070	0,6230	0,0252	0,2887	0,0129	0,0083
	Nghiệm chính xác 3D [5]	**0,5080**	**0,6240**	**0,0253**	**0,4390**	**0,0108**	**0,0083**

Bảng 3 trình bày các giá trị chuyển vị và ứng suất không thứ nguyên theo chiều dày của tấm chữ nhật ba lớp với các tỷ số *a/h* khác nhau. Có thể nhận thấy rằng, đối với các tấm tương đối dày với *a/h* = 4-10, kết quả thu được từ các hàm cơ sở nhìn chung gần tiến đến nghiệm chính xác của Pagano [5], đặc biệt gần như trùng khớp với hàm đa thức bậc 3 của Reddy [2]. Khi tỷ số *a/h* tăng lên, đặc biệt tại *a/h* = 100, các kết quả đạt được hoàn toàn trùng khớp với nhau và sát với nghiệm tham khảo. Xu hướng này có thể được giải thích bởi khi *a/h* tăng, chiều dày tấm trở nên rất nhỏ so với kích thước, do đó ảnh hưởng của biến dạng cắt ngang và các hiệu ứng bậc cao

giảm đáng kể. Khi đó, hình học của tấm tiến gần đến giả thiết tấm mỏng, và các mô hình lý thuyết bậc cao có xu hướng hội tụ về cùng một nghiệm. Đặc biệt, sự tương đồng tốt giữa các hàm bậc cao được khảo sát cho thấy tính nhất quán và độ tin cậy của hàm cơ sở đề xuất. Những kết quả này khẳng định khả năng của phương pháp đề xuất trong việc mô phỏng chính xác ứng xử cơ học của tấm composite nhiều lớp trên một phạm vi rộng của tỷ số *a/h*, đồng thời cho thấy tiềm năng ứng dụng hiệu quả trong các bài toán phân tích kết cấu composite nhiều lớp.



Hình 5. Sự phân bố ứng suất của các hàm bậc cao theo chiều dày tấm chữ nhật 3 lớp $[0^0 / 90^0 / 0^0]$ chịu tải phân bố hình sin.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đề xuất hàm biến dạng cắt bậc ba dựa trên đa thức Chebyshev kết hợp với phương pháp phân tích đẳng hình học (IGA-Chebyshev) để phân tích ứng xử tĩnh của tấm composite nhiều lớp. Hàm Chebyshev cho phép mô tả linh hoạt biến dạng cắt theo chiều dày mà không cần sử dụng hệ số hiệu chỉnh cắt. Các kết quả số cho thấy mô hình đề xuất có khả năng hội tụ tốt và phù hợp với các nghiệm tham khảo cũng như nghiệm chính xác 3D, qua đó khẳng định độ tin cậy và hiệu quả của phương pháp. Trong tương lai, mô hình có thể được mở rộng cho các bài toán dao động tự do, ổn định, động lực học và phi tuyến của kết cấu composite có hình học và vật liệu phức tạp.

Lời cảm ơn: Công trình nghiên cứu thuộc đề tài có mã số SV2026 - 355 được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM (HCM-UTE).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. D. Mindlin. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates. Journal of Applied Mechanics, vol. 18, no. 1, pp. 31-38, 1951.

[2] J. N. Reddy. A simple higher-order theory for laminated composite plates. Journal of Applied Mechanics, vol. 51, no. 4, pp. 745-752, 1984.

[3] J. A. Cottrell, Y. Bazilevs, T. J. R. Hughes. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 194, no. 39-41, pp. 4135-4195, 2005.

[4] Chien H. Thai, P. Phung-Van, Lieu B. Nguyen. Chebyshev polynomials in moving Kriging meshfree method for laminated composite plates. Finite Elements in Analysis and Design, vol. 245, 2025.

[5] N. J. Pagano. Exact solutions for rectangular bidirectional composites and sandwich plates. Journal of Composite Materials, vol. 4, no. 1, pp. 20-34, 1970.

[6] M. Aydoğdu. A new shear deformation theory for laminated composite plates. Composite Structures, vol. 89, no. 1, pp. 94-101, 2009.

[7] B. N. Singh, D. K. Maiti, Neeraj Grover. A new inverse hyperbolic shear deformation theory for static and buckling analysis of laminated composite and sandwich plates. Composite Structures (Elsevier), vol. 95, pp. 667-675, 2013.

[8] K. Swaminathan, T. Kant. Analytical solutions for static analysis of laminated composite and sandwich plates based on a higher order refined theory. Composite Structures, vol. 56, no. 4, pp. 329-344, 2002.

[9] A. S. Oktem, C. G. Soares, J. L. Mantari. A new trigonometric shear deformation theory for isotropic, laminated composite and sandwich plates. Composite Structures, vol. 94, no. 2, pp. 714-723, 2012.

[10] S. E. Kim, H. T. Thai. A review of theories for the modeling and analysis of functionally graded plates and shells. Composite Structures, vol. 128, pp. 20-36, 2015.

[11] Loc V. Tran, Chien H. Thai, Thoi Nguyen-Thoi, Hung Nguyen-Xuan. Analysis of laminated composite plates using higher-order shear deformation theory and isogeometric approach. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 99, no. 11, pp. 812-839, 2014.

[12] Chien H. Thai, A. J. M. Ferreira, S. P. A. Bordas, T. Rabczuk, Hung Nguyen-Xuan. Isogeometric analysis of laminated composite plates using a new inverse trigonometric shear deformation theory. European Journal of Mechanics - A/Solids, vol. 43, pp. 43-57, 2014.

■ Ngày nộp bài: 28/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 08/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/9/2026

Xây dựng hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu hàng hải sử dụng AIS và LiDAR cho phương tiện mặt nước không người lái phục vụ giám sát giao thông đường thủy

Development of an AIS-LiDAR maritime data acquisition and processing system for unmanned surface vehicles in waterway traffic monitoring

> **PGS.TS NGUYỄN ĐÌNH THẠCH**
Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: thachnd.ddt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Giám sát giao thông đường thủy đòi hỏi khả năng thu thập liên tục thông tin nhận dạng, vị trí và chuyển động của phương tiện, đồng thời phát hiện các mục tiêu không cung cấp dữ liệu nhận dạng tự động. Nghiên cứu này trình bày hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu hàng hải trên phương tiện mặt nước không người lái phục vụ giám sát giao thông đường thủy. Hệ thống sử dụng bộ thu AIS giao tiếp USB để thu nhận thông tin nhận dạng, vị trí, tốc độ và hướng chuyển động của tàu, kết hợp LiDAR để xác định khoảng cách, phương vị và vị trí tương đối của các mục tiêu xung quanh USV. Dữ liệu từ hai nguồn được tiền xử lý, đồng bộ thời gian, chuyển đổi về cùng hệ tọa độ và liên kết nhằm xây dựng bản đồ tình huống giao thông cục bộ. Hệ thống cho phép nhận biết phương tiện phát AIS, mục tiêu chỉ được LiDAR phát hiện và mục tiêu được xác nhận đồng thời bởi hai nguồn dữ liệu, qua đó hỗ trợ theo dõi phương tiện, phát hiện vật cản và nâng cao khả năng giám sát an toàn giao thông đường thủy.

Từ khóa: AIS; giao thông đường thủy; LiDAR; phương tiện mặt nước không người lái; xử lý dữ liệu hàng hải.

ABSTRACT

Inland waterway traffic monitoring requires continuous acquisition of vessel identification, position and motion information while maintaining the capability to detect targets that do not provide automatic identification data. This study presents a maritime data acquisition and processing system deployed on an unmanned surface vehicle for waterway traffic monitoring. The system employs a USB-based Automatic Identification System receiver to acquire vessel identity, position, speed and course information, while LiDAR is used to determine the range, bearing and relative position of surrounding targets. Data from the two sensing sources are preprocessed, time-synchronized, transformed into a common coordinate system and associated to construct a local traffic situation map around the USV. The proposed system enables the identification of AIS-equipped vessels, LiDAR-only targets and targets simultaneously confirmed by both sensing sources. The developed platform therefore supports vessel tracking, obstacle detection, traffic situation assessment and improved situational awareness for waterway traffic safety monitoring.

Keywords: Automatic Identification System; LiDAR; maritime data processing; unmanned surface vehicle; waterway traffic monitoring.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Giám sát giao thông đường thủy đòi hỏi khả năng thu thập liên tục thông tin nhận dạng, vị trí và trạng thái chuyển động của phương tiện nhằm hỗ trợ theo dõi, cảnh báo và nâng cao an toàn hàng hải. Bên cạnh các hệ thống quan trắc cố định từ bờ, phương tiện mặt nước không người lái (Unmanned Surface Vehicle - USV) đang được quan tâm như một nền tảng cảm biến di động có khả năng triển khai tại luồng hẹp, khu vực cảng và cửa sông. Một số nghiên cứu trong nước đã bước đầu phát triển USV phục vụ giám sát và thu thập dữ liệu trong môi trường cảng, cho thấy tiềm năng ứng dụng của phương tiện này trong giao thông đường thủy thông minh [1].

Hệ thống nhận dạng tự động AIS cung cấp các thông tin quan trọng như MMSI, vị trí, tốc độ và hướng chuyển động của tàu. Các giải pháp thu AIS sử dụng bộ thu USB hoặc RTL-SDR đã được nghiên cứu nhằm giảm chi phí và tăng khả năng triển khai thực tế [2]. Tuy nhiên, AIS chỉ cung cấp dữ liệu đối với các phương tiện có trang bị và duy trì phát tín hiệu, do đó khó phát hiện tàu nhỏ, vật cản nổi hoặc các mục tiêu không phát AIS. Ngược lại, LiDAR có khả năng đo trực tiếp khoảng cách và phương vị của các đối tượng xung quanh mà không phụ thuộc vào tín hiệu chủ động từ mục tiêu. Công nghệ này đã được nghiên cứu trong các bài toán giám sát cập cảng và phát hiện tàu cho phương tiện tự hành [3, 4]. Vì vậy, việc kết hợp AIS với LiDAR có thể bổ sung thông tin nhận dạng tầm xa của AIS bằng dữ liệu hình học cục bộ từ LiDAR, qua đó nâng cao mức độ nhận biết tình huống giao thông. Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh hiệu quả của hợp nhất dữ liệu AIS với camera, radar hoặc LiDAR trong theo dõi phương tiện và giám sát giao thông đường thủy [5, 6]. Tuy nhiên, quá trình tích hợp vẫn gặp các vấn đề như khác biệt về tần số cập nhật, hệ tọa độ, sai lệch vị trí và liên kết mục tiêu giữa các nguồn dữ liệu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này xây dựng hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu hàng hải trên USV sử dụng bộ thu AIS giao tiếp USB kết hợp LiDAR. Dữ liệu từ hai cảm biến được tiền xử lý, đồng bộ thời gian, chuyển đổi về cùng hệ tọa độ và liên kết mục tiêu nhằm xây dựng bản đồ tình huống giao thông cục bộ. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá khả năng thu nhận dữ liệu AIS, phát hiện mục tiêu bằng LiDAR và kết hợp hai nguồn thông tin để hỗ trợ nhận biết phương tiện có AIS, mục tiêu không phát AIS và các đối tượng được xác nhận đồng thời bởi cả hai nguồn cảm biến [3, 7, 8].

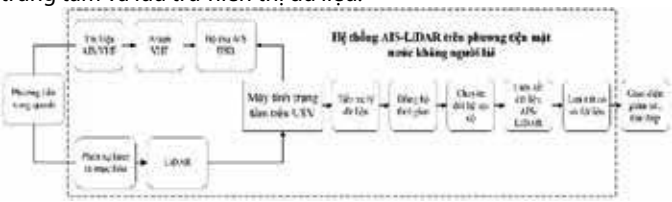
Nội dung bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày kiến trúc tổng thể của hệ thống thu thập dữ liệu hàng hải trên phương tiện mặt nước không người lái, bao gồm bộ thu AIS giao tiếp USB, LiDAR và nền tảng xử lý dữ liệu. Mục 3 trình bày phương pháp tiền xử lý, đồng bộ thời gian, chuyển đổi hệ tọa độ và liên kết dữ liệu AIS-LiDAR nhằm xác định và theo dõi các mục tiêu giao thông đường thủy. Mục 4 mô tả thiết lập thực nghiệm và phân tích kết quả đánh giá khả năng thu nhận dữ liệu AIS, phát hiện mục tiêu bằng LiDAR, liên kết mục tiêu và xây dựng bản đồ tình huống giao thông cục bộ. Cuối cùng, các kết luận chính và hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu được trình bày trong Mục 5.

2. XÂY DỰNG HỆ THỐNG THU THẬP DỮ LIỆU HÀNG HẢI TRÊN USV

2.1. Kiến trúc tổng thể của hệ thống

Hệ thống tích hợp AIS và LiDAR trên USV để thu nhận thông tin giao thông xung quanh. AIS cung cấp dữ liệu nhận dạng và chuyển động, còn LiDAR cung cấp thông tin hình học cục bộ, giúp hai nguồn bổ sung cho nhau [4, 6].

Như Hình 1, hệ thống gồm các khối thu AIS, thu LiDAR, xử lý trung tâm và lưu trữ-hiển thị dữ liệu.



Hình 1. Kiến trúc tổng thể hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu AIS-LiDAR trên USV

Trong kiến trúc này, các chức năng điều khiển chuyển động của USV được tách khỏi khối thu thập dữ liệu nhằm bảo đảm hệ thống cảm biến có thể hoạt động liên tục và độc lập với chế độ điều khiển phương tiện.

2.2. Khối thu nhận dữ liệu AIS

Khối AIS gồm ăng-ten VHF, bộ thu AIS qua USB và phần mềm giải mã trên máy tính trung tâm như Hình 2. Các bản tin AIS được thu, truyền qua USB để giải mã và lưu trữ. Giải pháp USB giúp giảm kích thước phần cứng và thuận lợi khi tích hợp trên USV có không gian, nguồn điện hạn chế [2].

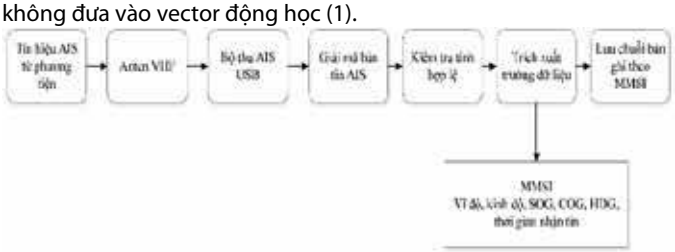
Sau quá trình giải mã, một bản ghi AIS tại thời điểm t_k được biểu diễn dưới dạng:

$$\boldsymbol{z}_{AIS}^{i}(t_k) = [\phi_i(t_k) \quad \lambda_i(t_k) \quad v_i(t_k) \quad \chi_i(t_k) \quad \psi_i(t_k)]^T \qquad (1)$$

Trong đó:

$(\boldsymbol{z}_{AIS}^{i})$: Vector trạng thái của phương tiện thứ (*i*); (t_k): Thời điểm nhận bản tin; (ϕ_i): Vĩ độ; (λ_i): Kinh độ; (v_i): Tốc độ trên mặt đất, SOG; (χ_i): Hướng chuyển động; COG; (ψ_i): Hướng mũi tàu, HDG;(T): Phép chuyển vị vector.

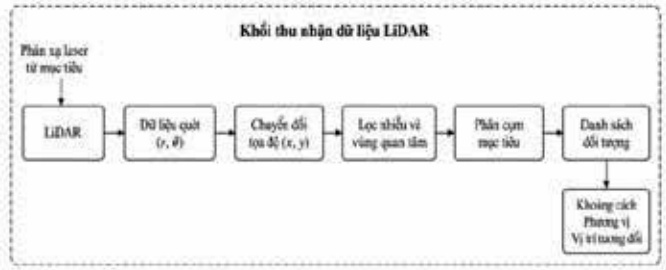
MMSI được sử dụng như khóa nhận dạng của phương tiện và không đưa vào vector động học (1).



Hình 2. Sơ đồ khối thu nhận và xử lý sơ bộ dữ liệu AIS trên USV

2.3. Mô hình dữ liệu LiDAR

LiDAR đo trực tiếp khoảng cách và phương vị các điểm phản xạ quanh USV mà không yêu cầu mục tiêu phát tín hiệu. Vì vậy, cảm biến có thể phát hiện tàu nhỏ, phao, vật cản hoặc phương tiện không phát AIS như Hình 3, đồng thời cung cấp dữ liệu vị trí phục vụ phát hiện và theo dõi mục tiêu gần bờ [8, 9].



Hình 3. Sơ đồ khối thu nhận và xử lý sơ bộ dữ liệu LiDAR trên USV

Đối với LiDAR 2D, tập dữ liệu của một chu kỳ quét tại thời điểm t_k được biểu diễn:

$$\mathcal{P}_L(t_k) = \{[r_j(t_k), \theta_j(t_k)]\}_{j=1}^{N_k} \qquad (2)$$

Trong đó: $(\mathcal{P}_L(t_k))$: Tập dữ liệu LiDAR tại thời điểm (t_k); (r_j): Khoảng cách từ LiDAR tới điểm phản xạ thứ (*j*); θ_j: Góc quét tương ứng; (*j*): Chỉ số điểm đo; (N_k): Số điểm hợp lệ trong chu kỳ quét thứ (*k*).

Dữ liệu LiDAR ban đầu ở hệ tọa độ cực được chuyển sang hệ tọa độ Descartes gắn với cảm biến [8, 11].

$$\begin{cases} x_j^L = r_j \cos\theta_j \\ y_j^L = r_j \sin\theta_j \end{cases} \qquad (3)$$

Trong đó:

$(x_j^L), (y_j^L)$: Tọa độ điểm thứ (*j*) trong hệ LiDAR (L);

(r_j): Khoảng cách đo;

(θ_j): Góc quét.

2.4. Chuyển đổi từ hệ tọa độ LiDAR sang hệ tọa độ thân USV

Do vị trí và hướng lắp LiDAR không trùng hoàn toàn với hệ tọa độ thân USV, dữ liệu quét cần được hiệu chỉnh trước khi sử dụng. Quan hệ giữa hai hệ tọa độ được mô tả bằng phép quay và tịnh tiến để chuyển các điểm LiDAR sang hệ tọa độ thân hoặc hệ tọa độ định

vị [10, 11].

Với mô hình chuyển động 2D trên mặt phẳng ngang, tọa độ điểm LiDAR trong hệ thân USV được xác định:

$$\boldsymbol{p}_j^B = \boldsymbol{R}(\alpha_L)\boldsymbol{p}_j^L + \boldsymbol{t}_L^B \quad (4)$$

Ma trận quay:

$$\boldsymbol{R}(\alpha_L) = \begin{bmatrix} cos\,\alpha_L & -sin\,\alpha_L \\ sin\,\alpha_L & cos\,\alpha_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó:

($\boldsymbol{p}_j^L = [x_j^L, y_j^L]^T$): Vị trí điểm trong hệ LiDAR; ($\boldsymbol{p}_j^B = [x_j^B, y_j^B]^T$): Vị trí điểm trong hệ thân USV; (α_L): Góc lắp LiDAR so với trục dọc USV; ($\boldsymbol{R}(\alpha_L)$): Ma trận quay; ($\boldsymbol{t}_L^B = [t_x, t_y]^T$): Vector vị trí lắp cảm biến so với gốc hệ thân.

Phép hiệu chỉnh cả sai lệch hướng và vị trí lắp LiDAR. Trong trường hợp cảm biến được bố trí chính xác tại gốc hệ thân và trục quét song song với trục dọc USV thì ($\boldsymbol{t}_L^B \approx 0$) và ($\alpha_L \approx 0$).

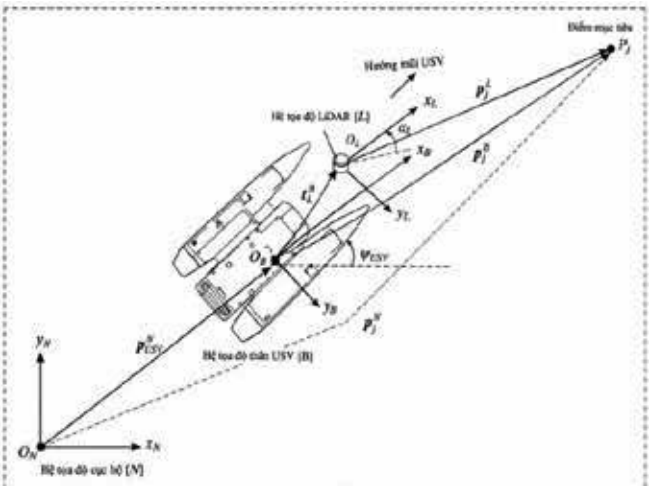
2.5. Chuyển đổi từ hệ thân USV sang hệ tọa độ cục bộ

Để dữ liệu LiDAR có thể so sánh với vị trí mục tiêu nhận từ AIS, các điểm hoặc tâm cụm LiDAR cần được biểu diễn trong một hệ tọa độ cục bộ thống nhất. Trong nghiên cứu này sử dụng hệ tọa độ phẳng cục bộ (N), trong đó trục (x_N) và (y_N)biểu diễn hai phương ngang của vùng giám sát.

Với vị trí USV trong hệ cục bộ là $[x_{USV}, y_{USV}]^T$ và góc hướng của USV là (ψ_{USV}), điểm quan sát trong hệ thân được chuyển sang hệ cục bộ theo:

$$\boldsymbol{p}_j^N = \boldsymbol{p}_{USV}^N + \boldsymbol{R}(\psi_{USV})\boldsymbol{p}_j^B \quad (6)$$

Trong đó: ($\boldsymbol{p}_j^N = [x_j^N, y_j^N]^T$): Vị trí mục tiêu trong hệ tọa độ cục bộ; ($\boldsymbol{p}_{USV}^N$): Vị trí hiện thời của USV; (ψ_{USV}): Góc hướng của USV; ($\boldsymbol{R}(\psi_{USV})$): Ma trận quay từ hệ thân sang hệ cục bộ; ($\boldsymbol{p}_j^B$): Tọa độ mục tiêu trong hệ thân [10], [11]. Trong nghiên cứu này, $\{N\}$ là hệ tọa độ cục bộ phẳng 2D dùng để biểu diễn vị trí mục tiêu trong vùng giám sát, với trục x_N và $y_N$là hai trục trực giao cố định.



Hình 4. Quan hệ giữa hệ tọa độ LiDAR, hệ tọa độ thân USV và hệ tọa độ cục bộ

Trong Hình 4, $\{L\}, \{B\}, \{N\}$ lần lượt là hệ tọa độ LiDAR, hệ tọa độ thân USV và hệ tọa độ cục bộ. Gốc O_L là gốc hệ LiDAR, O_B là gốc hệ thân USV và O_N là gốc hệ tọa độ cục bộ. Góc α_L biểu thị sai lệch hướng lắp đặt giữa LiDAR và thân USV, trong khi ψ_{USV} là góc hướng của USV trong hệ tọa độ cục bộ.

3. PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ VÀ LIÊN KẾT DỮ LIỆU AIS-LIDAR

3.1. Đồng bộ thời gian và chuyển đổi dữ liệu về hệ tọa độ chung

AIS và LiDAR khác nhau về tần số cập nhật, thời điểm thu nhận và hệ tọa độ. LiDAR quét với tần số cao, trong khi AIS cập nhật không đồng đều, gây sai lệch khi liên kết mục tiêu, đặc biệt khi phương tiện thay đổi vận tốc hoặc hướng [3, 5, 7].

Sai lệch thời gian giữa dữ liệu AIS của mục tiêu thứ (*i*) và quan sát LiDAR thứ (*j*) được xác định:

$$\Delta t_{ij} = \left|t_{AIS}^i - t_L^j\right|, \qquad \Delta t_{ij} \le \tau_t \quad (7)$$

Trong đó: (t_{AIS}^i), (t_L^j) lần lượt là thời điểm của bản tin AIS và quan sát LiDAR; (τ_t) là ngưỡng thời gian cho phép.

Để bù sai lệch giữa thời điểm phát sinh bản tin AIS và thời điểm quét LiDAR, vị trí AIS được ngoại suy theo mô hình vận tốc không đổi:

$$\widehat{\boldsymbol{p}}_{AIS}^i(t_L) = \boldsymbol{p}_{AIS}^i(t_k) + \boldsymbol{v}_{AIS}^i(t_k)(t_L - t_k) \quad (8)$$

Trong đó: ($\boldsymbol{p}_{AIS}^i(t_k)$) là vị trí tại bản tin gần nhất; ($\boldsymbol{v}_{AIS}^i$) là vector vận tốc được xác định từ SOG và COG; ($\widehat{\boldsymbol{p}}_{AIS}^i(t_L)$) là vị trí AIS sau khi hiệu chỉnh về thời điểm LiDAR.

Tiếp theo, dữ liệu AIS ở hệ tọa độ địa lý được chuyển sang hệ tọa độ cục bộ nhằm thống nhất với dữ liệu LiDAR:

$$x_{AIS} = R_E(\lambda - \lambda_0)\,cos\,\phi_0\; y_{AIS} = R_E(\phi - \phi_0) \quad (9)$$

Trong đó: (R_E) là bán kính trái đất quy ước; (ϕ, λ) là vĩ độ và kinh độ của phương tiện; (ϕ_0, λ_0) là tọa độ tham chiếu; (x_{AIS}, y_{AIS}) là tọa độ cục bộ tương ứng.

3.2. Xây dựng đặc trưng liên kết AIS-LiDAR

Sau khi thống nhất thời gian và hệ tọa độ, mỗi phương tiện AIS và mỗi cụm mục tiêu LiDAR được biểu diễn bởi các đặc trưng không gian và động học [6, 12].

Khoảng cách vị trí giữa mục tiêu AIS thứ (*i*) và mục tiêu LiDAR thứ (*j*) được xác định:

$$d_{ij}^p = \left\|\widehat{\boldsymbol{p}}_{AIS}^i - \boldsymbol{p}_L^j\right\|_2 \quad (10)$$

Trong đó: ($\widehat{\boldsymbol{p}}_{AIS}^i$) là vị trí AIS đã đồng bộ thời gian và ($\boldsymbol{p}_L^j$) là vị trí tâm cụm LiDAR.

Sai lệch phương vị được xác định:

$$d_{ij}^\beta = \left|\beta_{AIS}^i - \beta_L^j\right| \quad (11)$$

Sai lệch vận tốc:

$$d_{ij}^v = \left|v_{AIS}^i - v_L^j\right| \quad (12)$$

Để phản ánh chất lượng không đồng đều của hai nguồn dữ liệu, nghiên cứu sử dụng hệ số độ tin cậy:

$$q_{AIS} = e^{-\gamma \Delta t_{AIS}}, \qquad q_L = min\left(1, \frac{N_c}{N_{ref}}\right) \quad (13)$$

Trong đó: (q_{AIS}) giảm khi bản tin AIS trở nên cũ; (γ) là hệ số suy giảm; (N_c) là số điểm thuộc cụm LiDAR; (N_{ref}) là số điểm tham chiếu.

Trên cơ sở các đặc trưng trên, hàm chi phí liên kết được xây dựng:

$$J_{ij} = \frac{1}{q_{AIS}q_L + \varepsilon}\left(w_p\frac{d_{ij}^p}{D_p} + w_\beta\frac{d_{ij}^\beta}{D_\beta} + w_v\frac{d_{ij}^v}{D_v} + w_t\frac{\Delta t_{ij}}{D_t}\right) \quad (14)$$

Trong đó: (D_p, D_β, D_v, D_t) là các hệ số chuẩn hóa; (w_p, w_β, w_v, w_t) là trọng số và thỏa mãn:

$$[w_p + w_\beta + w_v + w_t = 1]$$

Giá trị (J_{ij}) càng nhỏ thì khả năng hai quan sát thuộc cùng một phương tiện càng cao.

3.3. Thuật toán liên kết và phân loại mục tiêu AIS-LiDAR

Trên cơ sở hàm chi phí trong phương trình (14), nghiên cứu xây dựng thuật toán liên kết mục tiêu theo ba giai đoạn: Tạo tập ứng viên, lựa chọn cặp liên kết tối ưu và phân loại trạng thái mục tiêu. Đầu tiên, với mỗi bản ghi AIS, hệ thống chỉ xem xét các mục tiêu LiDAR thỏa mãn đồng thời điều kiện về thời gian và khoảng cách.

$$j^* = argmin_{\;j} J_{ij} \quad (15)$$

Cặp ((i, j^*)) chỉ được chấp nhận khi:

$$[J_{ij^*} < J_{th}] \quad (16)$$

Trong đó: (J_{th}) là ngưỡng liên kết được xác định từ dữ liệu thực nghiệm.

Từ đó, tác giả xây dựng thuật toán liên kết và phân loại mục tiêu AIS-LiDAR như sau:

Thuật toán 1. Liên kết và phân loại mục tiêu AIS-LiDAR
Input: Tập AIS A, tập LiDAR L, ngưỡng τ_t và J_{th} 1: Đồng bộ AIS-LiDAR theo sai lệch thời gian, công thức (7) 2: Ngoại suy vị trí AIS tới thời điểm LiDAR, công thức (8) 3: Chuyển dữ liệu AIS về hệ tọa độ cục bộ, công thức (9) 4: Tạo các cặp ứng viên AIS-LiDAR thỏa mãn điều kiện thời gian 5: Tính sai lệch vị trí d_{ij}^{p} theo công thức (10) 6: Tính sai lệch phương vị d_{ij}^{β} và vận tốc d_{ij}^{v} theo công thức (11)-(12) 7: Tính độ tin cậy (q_{AIS}), (q_L)theo công thức (13) 8: Tính hàm chi phí liên kết (J_{ij}) theo công thức (14) 9: Chọn j^*theo công thức (15); nếu $[J_{ij^*} < J_{th}]$ theo (16), gán AIS-LiDAR 10: Gán các mục tiêu còn lại thành AIS-only hoặc LiDAR-only và cập nhật bản đồ
Output: Tập mục tiêu AIS-LiDAR, AIS-only và LiDAR-only

Thuật toán đề xuất kết hợp đồng thời thông tin không gian, thời gian, động học và độ tin cậy dữ liệu.

4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Thiết lập thực nghiệm

Hệ thống được thử nghiệm trên khu vực cảng có đặt tích hợp bộ thu AIS giao tiếp USB, LiDAR 2D, mô-đun GNSS và máy tính xử lý trung tâm như Hình 5. Dữ liệu AIS, LiDAR và trạng thái USV được thu nhận đồng thời, gắn dấu thời gian và xử lý theo quy trình trình bày tại Mục 3. Thử nghiệm được xây dựng theo ba kịch bản nhằm đánh giá khả năng thu nhận, liên kết và phân loại mục tiêu trong môi trường giao thông đường thủy.

Kịch bản K1 sử dụng một phương tiện có phát AIS và nằm trong vùng quan sát của LiDAR để đánh giá khả năng liên kết hai nguồn dữ liệu. Kịch bản K2 sử dụng mục tiêu không phát AIS nhằm kiểm tra khả năng phát hiện độc lập của LiDAR. Kịch bản K3 gồm nhiều phương tiện có và không có AIS để đánh giá khả năng phân loại đồng thời các mục tiêu AIS-only, LiDAR-only và AIS-LiDAR.

Hình 5. Bố trí thiết bị và khu vực thực nghiệm hệ thống AIS-LiDAR

Bảng 1 mô tả kịch bản thử nghiệm tại cầu cảng và khu vực luồng.

Bảng 1. Các kịch bản thực nghiệm

Kịch bản	Điều kiện thực nghiệm	Mục tiêu đánh giá
K1	Một phương tiện có phát AIS và nằm trong vùng quan sát của LiDAR	Đánh giá khả năng đồng bộ và liên kết mục tiêu AIS-LiDAR
K2	Một phương tiện/mục tiêu không phát AIS nhưng nằm trong vùng quan sát của LiDAR	Đánh giá khả năng phát hiện và duy trì mục tiêu LiDAR-only
K3	Nhiều phương tiện, gồm mục tiêu có AIS và không có AIS	Đánh giá khả năng liên kết, phân loại và duy trì đa mục tiêu

Hai chỉ tiêu chính được sử dụng là sai số vị trí và độ chính xác liên kết. Sai số vị trí được đánh giá thông qua:

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}[(x_k - \hat{x}_k)^2 + (y_k - \hat{y}_k)^2]} \qquad (17)$$

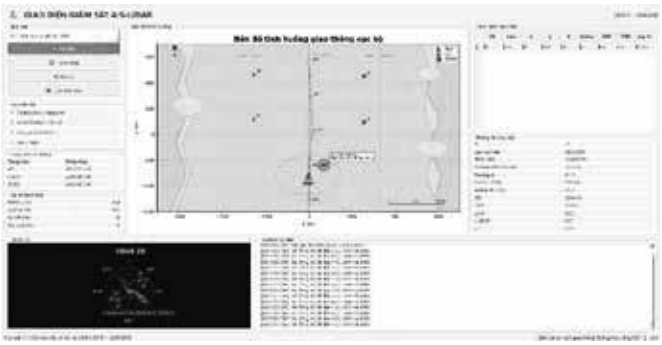
Trong đó: (x_k, y_k)là tọa độ tham chiếu; $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ là tọa độ ước lượng và (*N*) là số mẫu đánh giá. Độ chính xác liên kết được xác định:

$$A_{assoc} = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \times 100\% \qquad (18)$$

Trong đó: $(N_{correct})$ là số cặp AIS–LiDAR được liên kết đúng và (N_{total}) là tổng số trường hợp liên kết được đánh giá.

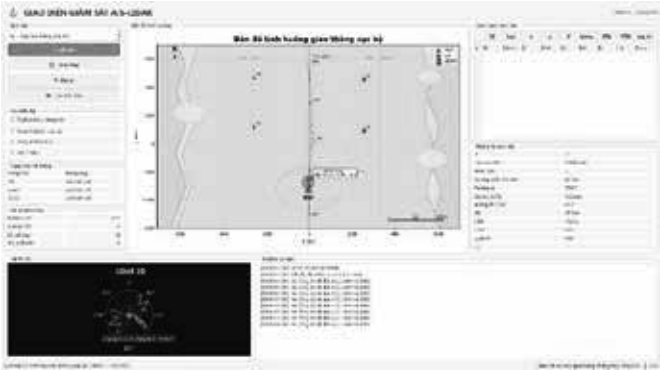
4.2. Kết quả thực nghiệm

Trong kịch bản K1, mục tiêu được quan sát đồng thời bởi AIS và LiDAR như Hình 6, sau đó đồng bộ và liên kết trong hệ tọa độ cục bộ. Kết quả cho thấy $RMSE_p$ đạt 0,42 m và độ chính xác liên kết đạt 98,7%, cho thấy khả năng duy trì liên kết ổn định giữa hai nguồn dữ liệu.



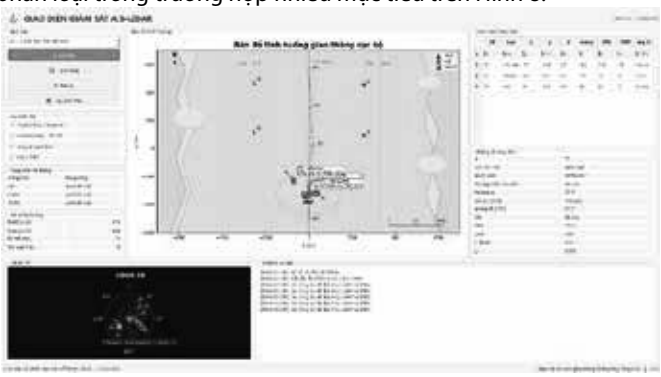
Hình 6. So sánh quỹ đạo mục tiêu thu được từ AIS và LiDAR trong kịch bản K1

Trong kịch bản K2, mục tiêu không phát AIS vẫn được LiDAR phát hiện và duy trì ở trạng thái LiDAR-only trong phạm vi quan sát thiết lập tối đa 30 m như Hình 7.



Hình 7. So sánh quỹ đạo mục tiêu không phát AIS trong kịch bản K2

Đối với kịch bản K3, hệ thống đồng thời duy trì các mục tiêu AIS-LiDAR, AIS-only và LiDAR-only. Độ chính xác liên kết đạt 92,4%, độ trễ xử lý trung bình khoảng 36 ms và tần suất cập nhật đạt 10 Hz. Kết quả cho thấy thuật toán vẫn duy trì được khả năng liên kết và phân loại trong trường hợp nhiều mục tiêu trên Hình 8.



Hình 8. Bản đồ tình huống giao thông với các mục tiêu AIS-only, LiDAR-only và AIS-LiDAR

Kết quả thử nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả ba kịch bản

Chỉ tiêu đánh giá	K1	K2	K3
Số mục tiêu quan sát	1	1	4
Tầm quan sát LiDAR (m)	30	30	30
RMSE vị trí (m)	0,42	0,51	0,56
Tỷ lệ phát hiện LiDAR (%)	100	100	100
Độ chính xác liên kết (%)	98,7	–	92,4
Độ trễ xử lý / Tần suất cập nhật	32 ms / 10 Hz	35 ms / 10 Hz	36 ms / 10 Hz

4.3. Đánh giá và thảo luận

Kết quả cho thấy AIS và LiDAR có tính bổ sung rõ rệt: AIS cung cấp thông tin nhận dạng và trạng thái chuyển động, trong khi LiDAR cung cấp thông tin hình học trực tiếp và phát hiện được các mục tiêu không phát AIS. Nhờ đó, hệ thống vẫn duy trì khả năng nhận biết tình huống khi một nguồn dữ liệu không đầy đủ. Thuật toán đề xuất sử dụng đồng thời sai lệch vị trí, phương vị, vận tốc, thời gian và độ tin cậy để liên kết mục tiêu, qua đó giảm nguy cơ ghép nhầm và duy trì riêng các mục tiêu AIS-only hoặc LiDAR-only.

Chất lượng liên kết vẫn phụ thuộc vào độ chính xác GNSS, chu kỳ cập nhật AIS, cấu hình lắp đặt LiDAR, che khuất và điều kiện phản xạ. Tuy vậy, kết quả bước đầu cho thấy hệ thống có khả năng xây dựng bản đồ tình huống giao thông đa nguồn theo thời gian thực, phù hợp cho giám sát và cảnh báo an toàn đường thủy.

5. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã xây dựng hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu AIS-LiDAR trên USV phục vụ giám sát giao thông đường thủy. Phương pháp đề xuất cho phép đồng bộ, chuyển đổi tọa độ, liên kết và phân loại mục tiêu thành AIS-LiDAR, AIS-only và LiDAR-only, qua đó cải thiện khả năng nhận biết tình huống đa nguồn. Trong thời gian tới cần tiếp tục thử nghiệm thực địa với số lượng mục tiêu lớn hơn, đánh giá ảnh hưởng của điều kiện môi trường và hoàn thiện thuật toán liên kết, theo dõi mục tiêu. Hệ thống cũng có thể được mở rộng với chức năng cảnh báo va chạm và hỗ trợ điều hướng tự động cho USV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. Đ. Thạch. Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển phương tiện mặt nước không người lái phục vụ giám sát chất lượng môi trường cảng dựa trên thuật toán ACO. Tạp chí Giao thông vận tải, tập 64, số 5, tr. 132-135, 2024.

[2] N. T. Vân và B. Đ. Thịnh. Phát triển mô-đun thu tín hiệu AIS dựa trên RTL-SDR và OpenCPN. Tạp chí Giao thông vận tải, số 8, tr. 67-73, 2023.

[3] Y. Guo, R. W. Liu, J. Qu, Y. Lu, F. Zhu and Y. Lv. Asynchronous trajectory matching-based multimodal maritime data fusion for vessel traffic surveillance in inland waterways. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 24, no. 11, pp. 12779-12792, 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3285415.

[4] N. T. Vân. Nghiên cứu phát triển các bản tin ứng dụng đặc biệt (ASM-Application Specific Message) của hệ thống nhận dạng tự động (AIS) trong cảnh báo nguy cơ đâm va tàu thuyền. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 78, tr. 7-12, 2024.

[5] J. Qu, R. W. Liu, Y. Guo, Y. Lu, J. Su and P. Li. Improving maritime traffic surveillance in inland waterways using the robust fusion of AIS and visual data. Ocean Eng., vol. 275, Art. no. 114198, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114198.

[6] L. S. Tùng, P. T. Minh, N. T. K. Ly, N. P. Thảo, Đ. T. Q. Giang và V. T. Trà. Nghiên cứu hệ thống áp dụng công nghệ LiDAR hỗ trợ việc giám sát rủi ro của quá trình tàu cập cầu cảng. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 78, tr. 13-19, 2024.

[7] M. Baerveldt, J. Shuai and E. F. Brekke. Improved fusion of AIS data for multiple extended object tracking, in Proc. 27th Int. Conf. Information Fusion (FUSION), Venice, Italy, 2024, pp. 1-8, doi: 10.23919/FUSION59988.2024.10706459.

[8] Y. Xie, C. Nanlal and Y. Liu. Reliable LiDAR-based ship detection and tracking for autonomous surface vehicles in busy maritime environments. Ocean Eng., vol. 312, Art. no. 119288, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119288.

[9] Z. Yao, X. Chen, N. Xu, N. Gao and M. Ge. LiDAR-based simultaneous multi-object tracking and static mapping in nearshore scenario. Ocean Eng., vol. 272, Art. no. 113939, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113939.

[10] A. Engström, D. Geiseler, K. Blanch, O. Benderius and I. G. Daza. A LiDAR-only SLAM algorithm for marine vessels and autonomous surface vehicles. IFAC-PapersOnLine, vol. 55, no. 31, pp. 229-234, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.436.

[11] S. Wei, Y. Xiao, X. Yang and H. Wang. Attitude estimation method for target ships based on LiDAR point clouds via an improved RANSAC. J. Mar. Sci. Eng., vol. 11, no. 9, Art. no. 1755, 2023, doi: 10.3390/jmse11091755.

[12] C. Chen and Y. Li. Real-time tracking and dynamic berthing information extraction system with 2D LiDAR data. Ocean Eng., vol. 276, Art. no. 114181, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114181.

■ Ngày nộp bài: 28/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 07/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2026

Nghiên cứu đề xuất mô hình cảng thông minh tại Việt Nam nhằm nâng cao hiệu quả khai thác vận tải và logistics gắn với mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính

Proposed smart port development model in Vietnam to enhance transport and logistics efficiency while supporting greenhouse gas emission reduction goals

> **THS TRƯƠNG MINH HÒA**
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
Email: hoatm@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất mô hình phát triển cảng thông minh tại Việt Nam nhằm nâng cao hiệu quả vận tải, logistics và giảm phát thải khí nhà kính. Năm 2025, tổng hàng hóa qua cảng biển và cảng thủy nội địa ước đạt 1,17 tỷ tấn, tăng 12%, trong đó container đạt 34,36 triệu TEU, tăng 11% so với năm 2024. Tuy nhiên, số hóa, tự động hóa, liên thông dữ liệu và kết nối đa phương thức giữa các chủ thể còn chưa đồng đều, ảnh hưởng đến hiệu quả khai thác và kiểm soát phát thải.

Nghiên cứu sử dụng phân tích SWOT, kết hợp tổng hợp tài liệu, dữ liệu thực tiễn và đánh giá ứng dụng công nghệ. Kết quả cho thấy lợi thế về vị trí địa lý, nhu cầu logistics và tiềm năng công nghệ, nhưng còn hạn chế về hạ tầng số, dữ liệu, nhân lực và vốn đầu tư. Trên cơ sở đó, mô hình đề xuất gồm hạ tầng thông minh, nền tảng dữ liệu, IoT, AI, tự động hóa, logistics thông minh, quản lý năng lượng và phát thải, quản trị và phát triển nhân lực, triển khai theo lộ trình số hóa - kết nối - tự động hóa - thông minh hóa - xanh hóa, hướng tới hệ thống cảng hiệu quả, kết nối và bền vững phù hợp với Việt Nam.

Từ khóa: Mô hình; cảng thông minh.

ABSTRACT

This study proposes a smart port development model for Vietnam to enhance the efficiency of transportation and logistics operations while reducing greenhouse gas (GHG) emissions. In 2025, the total cargo volume handled through seaports and inland waterway ports was estimated at 1.17 billion tonnes, representing a 12% increase, of which container throughput reached 34.36 million TEUs, an 11% increase compared with 2024. However, digitalization, automation, data interoperability and multimodal connectivity among stakeholders remain uneven, affecting operational efficiency and emissions management.

The study employs SWOT analysis, complemented by a review of relevant literature, empirical data and an assessment of technology adoption. The findings highlight advantages in geographical location, logistics demand and technological potential, while identifying constraints related to digital infrastructure, data, human resources and investment capital. Accordingly, the proposed model incorporates smart infrastructure, a data platform, IoT, AI, automation, smart logistics, energy and emissions management and governance and human resource development. The model follows a roadmap of digitalization - connectivity - automation - intelligence - greening, aiming to develop an efficient, connected and sustainable port system aligned with Vietnam's conditions.

Keywords: Model; smart port.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cảng biển giữ vai trò quan trọng trong hệ thống vận tải và logistics quốc gia, là đầu mối kết nối vận tải biển với các phương thức khác, đồng thời phục vụ xuất nhập khẩu và lưu chuyển hàng hóa. Hiệu quả khai thác cảng tác động trực tiếp đến thời gian vận chuyển, chi phí logistics, chất lượng dịch vụ và năng lực cạnh tranh. Vì vậy, trước sự gia tăng nhu cầu vận tải và thương mại quốc tế, hệ thống cảng biển Việt Nam cần nâng cao năng lực khai thác, kết nối và chất lượng dịch vụ.

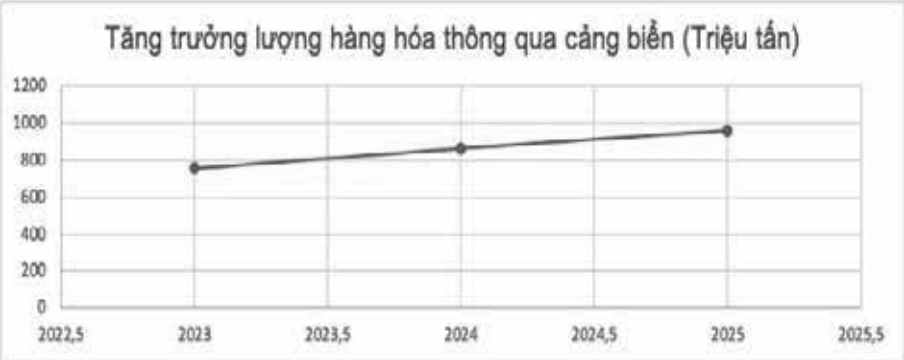
Trong bối cảnh chuyển đổi số, ứng dụng IoT, AI, dữ liệu lớn và tự động hóa đang trở thành yêu cầu thiết yếu nhằm tối ưu thiết bị, nâng cao năng suất và hiệu quả điều hành. Mô hình cảng thông minh (Smart Port) hướng đến kết hợp công nghệ số, tự động hóa và quản trị hiện đại, góp phần giảm thời gian chờ và tăng cường kết nối trong chuỗi logistics.

Bên cạnh đó, những hạn chế của phương thức khai thác truyền thống và yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính đặt ra nhu cầu đổi mới toàn diện. Do đó, nghiên cứu đề xuất mô hình cảng thông minh tại Việt Nam gắn với nâng cao hiệu quả khai thác vận tải, logistics và giảm phát thải là cần thiết, hướng tới hệ thống cảng biển thông minh, hiệu quả và xanh.

2. PHÂN TÍCH THỰC TRẠNG PHÁT TRIỂN CẢNG BIỂN THÔNG MINH TẠI VIỆT NAM

2.1. Tổng quan về cảng biển Việt Nam

Hệ thống cảng biển Việt Nam giữ vai trò quan trọng trong xuất nhập khẩu và logistics, đồng thời đang có tốc độ tăng trưởng hàng hóa và container cao. Năm 2024, tổng lượng hàng hóa thông qua cảng đạt khoảng 864,4 triệu tấn, tăng 14%, trong đó hàng container đạt 29,9 triệu TEU, tăng 21% so với năm 2023. Đến năm 2025, khối lượng hàng hóa thông qua cảng biển và cảng thủy nội địa ước đạt khoảng 1,17 tỷ tấn, tăng 12%, trong đó hàng container đạt 34,36 triệu TEU, tăng 11%. Xu hướng tăng trưởng này cho thấy nhu cầu khai thác và năng lực phục vụ của hệ thống cảng ngày càng lớn [1, 2, 3].



Hình 1. Tăng trưởng tổng lượng hàng hóa qua các cảng biển Việt Nam

2.2. Cơ sở nhận diện cảng thông minh

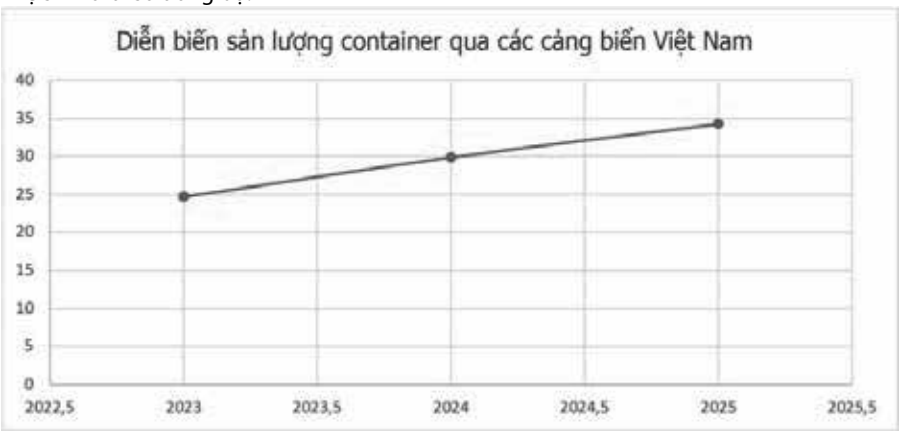
Cảng thông minh được nhận diện dựa trên mức độ số hóa, tự động hóa, kết nối dữ liệu và tối ưu hóa hoạt động. Các tiêu chí chủ yếu gồm: Hạ tầng số; ứng dụng IoT, AI, Big Data; tự động hóa thiết bị; kết nối cảng với chuỗi logistics và quản lý năng lượng, môi trường. Đây là cơ sở để đánh giá mức độ phát triển cảng thông minh tại Việt Nam.

2.3. Thực trạng ứng dụng công nghệ tại cảng biển Việt Nam

Các cảng biển lớn tại Việt Nam đã từng bước ứng dụng hệ thống quản lý cảng, cổng tự động, nhận dạng phương tiện, quản lý container và trao đổi dữ liệu điện tử. Tuy nhiên, mức độ ứng dụng còn chưa đồng đều giữa các cảng. Việc kết nối và chia sẻ dữ liệu giữa cảng, hãng tàu, doanh nghiệp logistics và cơ quan quản lý vẫn còn hạn chế, chưa hình thành hệ sinh thái số đồng bộ.

2.4. Thực trạng về hiệu quả khai thác và logistics

Sản lượng container tiếp tục tăng nhanh, từ 29,9 triệu TEU năm 2024 lên khoảng 34,36 triệu TEU năm 2025, tăng 11% so với năm trước, cho thấy nhu cầu khai thác và năng lực phục vụ cảng ngày càng lớn. Bên cạnh đó, chi phí logistics của Việt Nam vẫn ở mức tương đối cao, khoảng 16,8 - 17% GDP, trong khi mức bình quân thế giới khoảng 10,6%. Theo một báo cáo ngành logistics năm 2025, chi phí logistics hiện được ước tính khoảng 16% GDP, vẫn cao hơn nhiều nền kinh tế ASEAN. Những hạn chế về kết nối giao thông, ùn tắc, vận tải đa phương thức và chia sẻ thông tin làm gia tăng thời gian, chi phí vận chuyển và khai thác. Vì vậy, việc đẩy mạnh số hóa, kết nối dữ liệu và tối ưu hóa chuỗi logistics là yêu cầu cần thiết để nâng cao hiệu quả hoạt động cảng biển Việt Nam [1, 2, 3].



Hình 2. Tăng trưởng sản lượng container thông qua các cảng biển Việt Nam

3. PHÂN TÍCH SWOT CẢNG BIỂN VIỆT NAM ĐỂ XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÁT TRIỂN CẢNG THÔNG MINH TẠI VIỆT NAM

3.1. Điểm mạnh

Cảng biển Việt Nam có lợi thế lớn về vị trí địa lý, nằm trên các tuyến hàng hải quốc tế quan trọng, thuận lợi kết nối với khu vực Đông Á và thị trường toàn cầu. Hệ thống cảng biển ngày càng được đầu tư, mở rộng về quy mô và năng lực khai thác, trong khi nhu cầu vận chuyển hàng hóa và logistics tiếp tục tăng. Bên cạnh đó, Việt Nam có điều kiện phát triển kết nối đa phương thức giữa đường biển, đường bộ, đường sắt và đường thủy nội địa. Một số cảng lớn đã bước đầu triển khai hệ thống quản lý khai thác, tự động hóa và số hóa dữ liệu. Đây là nền tảng thuận lợi để ứng dụng AI, IoT, Big Data và tự động hóa, nâng cao năng suất và hiệu quả khai thác.

3.2. Điểm yếu

Bên cạnh những lợi thế, quá trình phát triển cảng thông minh tại Việt Nam còn tồn tại nhiều hạn chế. Mức độ tự động hóa và số hóa chưa đồng đều giữa các cảng, đặc biệt giữa các cảng lớn và cảng quy mô nhỏ. Hạ tầng công nghệ, hệ thống phần mềm và khả năng kết nối dữ liệu còn khác biệt, trong khi dữ liệu giữa cảng, hãng tàu, doanh nghiệp logistics và cơ quan quản lý chưa được liên thông đầy đủ. Nguồn nhân lực có chuyên môn về công nghệ, dữ liệu và quản trị số còn hạn chế. Ngoài ra, đầu tư cảng thông minh đòi hỏi nguồn vốn lớn, trong khi một số quy trình khai thác vẫn phụ thuộc nhiều vào phương thức truyền thống, làm giảm khả năng tối ưu hóa toàn bộ chuỗi logistics.

3.3. Cơ hội

Sự phát triển mạnh mẽ của chuyển đổi số và công nghệ 4.0 tạo ra nhiều cơ hội cho cảng biển Việt Nam xây dựng mô hình cảng thông minh. Các công nghệ như AI, IoT, Big Data, điện toán đám mây và tự động hóa ngày càng phổ biến, giúp tối ưu thiết bị, dự báo nhu cầu, giảm thời gian chờ và nâng cao năng suất khai thác. Đồng thời, nhu cầu nâng cao năng lực cạnh tranh logistics và giảm chi phí vận tải tạo động lực thúc đẩy số hóa cảng biển. Xu hướng xanh hóa vận tải biển và yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính cũng mở ra cơ hội kết hợp chuyển đổi số với quản lý năng lượng và môi trường. Ngoài ra, Việt Nam có thể tăng cường hợp tác với các doanh nghiệp công nghệ và logistics quốc tế.

3.4. Thách thức

Phát triển cảng thông minh cũng đối mặt với nhiều thách thức về tài chính, công nghệ và nguồn nhân lực. Chi phí đầu tư ban đầu cho hệ thống tự động hóa, thiết bị thông minh, hạ tầng dữ liệu và phần mềm quản lý tương đối lớn, gây khó khăn cho các cảng có nguồn lực hạn chế. Công nghệ thay đổi nhanh cũng làm tăng nguy cơ hệ thống đầu tư hôm nay nhanh chóng trở nên lỗi thời. Bên cạnh đó, việc kết nối và chia sẻ dữ liệu làm gia tăng rủi ro an ninh mạng, mất an toàn thông tin. Tình trạng thiếu nhân lực công nghệ chất lượng cao có thể ảnh hưởng đến khả năng vận hành hệ thống. Đồng thời, các cảng Việt Nam phải đối mặt với cạnh tranh ngày càng lớn từ các cảng trong khu vực và yêu cầu nghiêm ngặt hơn về môi trường, phát thải.

4. PHƯƠNG ÁN NGHIÊN CỨU ĐỂ GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích SWOT, kết hợp tổng hợp tài liệu, số liệu thực tiễn và đánh giá mức độ ứng dụng công nghệ tại các cảng biển Việt Nam. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất mô hình cảng thông minh tích hợp công nghệ số, tự động hóa, kết nối logistics và quản lý phát thải, phù hợp với điều kiện Việt Nam.

5. NHỮNG VẤN ĐỀ CẦN GIẢI QUYẾT

Dựa trên những phân tích, dự báo để xây dựng mô hình cảng thông minh phù hợp với điều kiện Việt Nam, cần tập trung giải quyết các vấn đề tồn tại sau:

- Mức độ ứng dụng công nghệ còn hạn chế: Việc ứng dụng IoT, AI, Big Data và tự động hóa tại các cảng chưa đồng đều, chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu xây dựng cảng thông minh.
- Hệ thống dữ liệu còn phân tán: Dữ liệu khai thác cảng, tàu, hàng hóa và phương tiện chưa được kết nối, chia sẻ đồng bộ giữa các bên trong chuỗi logistics.
- Thiếu nguồn nhân lực và chi phí đầu tư: Việc thiếu nhân lực công nghệ chất lượng cao và chi phí đầu tư lớn gây khó khăn cho quá trình triển khai, vận hành cảng thông minh.
- Kiểm soát phát thải còn hạn chế: Công tác theo dõi tiêu thụ năng lượng và phát thải khí nhà kính chưa được tích hợp đầy đủ vào hoạt động quản lý, khai thác cảng.
- Thiếu mô hình phù hợp với Việt Nam: Chưa có mô hình cảng thông minh được tích hợp đồng bộ giữa công nghệ, dữ liệu, logistics, tự động hóa và môi trường, phù hợp với điều kiện thực tế của Việt Nam.

6. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÁT TRIỂN CẢNG THÔNG MINH TẠI VIỆT NAM

6.1. Quan điểm xây dựng mô hình

Mô hình phát triển cảng thông minh tại Việt Nam cần phù hợp với điều kiện hạ tầng, quy mô khai thác và đặc điểm từng cảng. Dữ liệu và công nghệ là nền tảng, hiệu quả khai thác và logistics là mục tiêu, đồng thời giảm phát thải và phát triển xanh là yêu cầu xuyên suốt. Chẳng hạn, tại khu vực Cát Lái, mô hình có thể ưu tiên số hóa quản lý container và điều phối phương tiện do lưu lượng hàng hóa lớn, trong khi tại Cái Mép - Thị Vải có thể tập trung vào kết nối tàu quốc tế, tự động hóa và quản lý năng lượng. Mô hình cần triển khai theo từng giai đoạn để có thể mở rộng và nhân rộng.

6.2. Cấu trúc tổng thể mô hình

Mô hình được xây dựng theo: Chuỗi hạ tầng cảng → Dữ liệu và nền tảng số → Công nghệ thông minh → Điều hành khai thác → Kết nối logistics → Quản lý môi trường. Các thành phần có mối quan hệ liên kết, trong đó dữ liệu đóng vai trò trung tâm giúp công nghệ hỗ trợ ra quyết định. Ví dụ, tại Cảng Cát Lái, dữ liệu về lịch tàu, container, bãi và phương tiện có thể được tích hợp để dự báo nhu cầu và điều phối thiết bị. Kết quả hướng tới giảm thời gian chờ, nâng cao năng suất và giảm chi phí logistics.

6.2.1. Hạ tầng thông minh

Hạ tầng thông minh bao gồm hạ tầng số, cảm biến, thiết bị kết nối, mạng truyền dữ liệu và trung tâm điều hành. Các thiết bị có thể thu thập thông tin về vị trí container, tình trạng cẩu, phương tiện và hoạt động khai thác theo thời gian thực. Ví dụ, tại Cát Lái, cảm biến và camera có thể được sử dụng để nhận dạng xe, container và theo dõi tình trạng giao nhận, qua đó hỗ trợ điều phối phương tiện và giảm ùn tắc tại khu vực cổng cảng.

6.2.2. Nền tảng dữ liệu cảng

Nền tảng dữ liệu thực hiện thu thập, chuẩn hóa, lưu trữ, chia sẻ và phân tích dữ liệu từ tàu, container, phương tiện và thiết bị. Ví dụ, khi một tàu cập Cái Mép - Thị Vải, hệ thống có thể đồng thời tiếp nhận dữ liệu về lịch tàu, số lượng container, vị trí bãi và kế hoạch bốc dỡ. Việc tích hợp dữ liệu giúp các bộ phận khai thác sử dụng cùng một nguồn thông tin, hạn chế sai lệch và hỗ trợ ra quyết định nhanh hơn.

6.2.3. Công nghệ thông minh

Các công nghệ IoT, AI, Big Data, điện toán đám mây và tự động hóa được sử dụng để nâng cao hiệu quả vận hành. Chẳng hạn, AI có thể phân tích dữ liệu tại Cảng Lạch Huyện để dự báo sản lượng container và nhu cầu sử dụng cẩu trong từng thời điểm. Trên cơ sở đó, cảng có thể chủ động bố trí thiết bị và nhân lực, giảm thời gian

chờ và nâng cao năng suất. Digital Twin có thể được áp dụng ở giai đoạn phát triển cao hơn để mô phỏng hoạt động cảng.

6.2.4. Khai thác cảng thông minh

Hoạt động khai thác được tổ chức dựa trên dữ liệu nhằm tối ưu điều độ tàu, quản lý bãi, container, thiết bị và phương tiện. Ví dụ, tại Cát Lái, hệ thống có thể phân tích lịch lấy container của doanh nghiệp để bố trí vị trí container trong bãi hợp lý, đồng thời điều phối cẩu và xe đầu kéo, qua đó hạn chế việc đảo chuyển container nhiều lần, giảm thời gian chờ và nâng cao hiệu quả sử dụng thiết bị.

6.2.5. Logistics thông minh

Logistics thông minh tập trung kết nối cảng với doanh nghiệp vận tải, kho bãi và các trung tâm logistics. Ví dụ, tại khu vực Cát Lái, hệ thống có thể chia sẻ dữ liệu lịch tàu và thời gian giao nhận container với doanh nghiệp vận tải. Doanh nghiệp được phân bổ thời gian đưa xe vào cảng phù hợp với năng lực khai thác thực tế. Điều này giúp hạn chế tình trạng nhiều phương tiện tập trung cùng thời điểm, giảm ùn tắc và thời gian chờ.

6.2.6. Cảng xanh và giảm phát thải

Cảng thông minh cần tích hợp giám sát năng lượng, nhiên liệu và phát thải CO_2 trong quá trình khai thác. Ví dụ, tại Cái Mép - Thị Vải, dữ liệu tiêu thụ điện và nhiên liệu của cẩu, xe đầu kéo và thiết bị có thể được thu thập để xác định những hoạt động tiêu hao năng lượng lớn. Từ đó, cảng có thể ưu tiên điện hóa thiết bị, sử dụng năng lượng sạch và tối ưu thời gian vận hành, góp phần giảm phát thải.

6.3. Cơ chế vận hành của mô hình

Cơ chế vận hành được thực hiện theo chu trình: Thu thập dữ liệu → Phân tích → Dự báo → Tối ưu → Ra quyết định → Thực hiện → Đánh giá. Ví dụ, khi tàu chuẩn bị cập Cái Mép, hệ thống tiếp nhận thông tin về tàu và container, AI dự báo khối lượng hàng cần xử lý, sau đó đề xuất vị trí bãi, số lượng cẩu và phương tiện cần thiết. Sau khi khai thác, hệ thống tiếp tục đánh giá thời gian xử lý, mức tiêu thụ năng lượng và phát thải để cải thiện phương án cho các chuyến tàu tiếp theo.

6.4. Lộ trình phát triển cảng thông minh tại Việt Nam

Chúng ta nên phát triển cảng thông minh theo 5 giai đoạn: Số hóa - Kết nối - Tự động hóa - Thông minh hóa - Xanh hóa. Ví dụ, một cảng có thể bắt đầu bằng số hóa hồ sơ và quản lý container; tiếp theo kết nối dữ liệu với hãng tàu và doanh nghiệp logistics; sau đó tự động hóa cổng và thiết bị. Khi dữ liệu đủ lớn, cảng triển khai AI và dự báo. Cuối cùng tích hợp quản lý năng lượng, phát thải để hình thành cảng thông minh - cảng xanh.

6.5. Đánh giá hiệu quả mô hình đề xuất

Hiệu quả mô hình được đánh giá theo 4 nhóm: Khai thác, logistics, chuyển đổi số và môi trường. Ví dụ, tại Cát Lái có thể đánh giá thời gian xử lý container, năng suất cẩu và thời gian xe chờ; đối với logistics đánh giá thời gian và chi phí vận chuyển; về chuyển đổi số đánh giá mức độ tự động hóa và kết nối dữ liệu; về môi trường đánh giá mức tiêu thụ nhiên liệu, điện năng và lượng CO_2 phát thải. Các chỉ tiêu này giúp lượng hóa hiệu quả trước và sau khi triển khai mô hình.

6.6. Giải pháp triển khai mô hình

Để triển khai mô hình, cần đầu tư hạ tầng số, nền tảng dữ liệu, IoT, AI và tự động hóa theo khả năng của từng cảng. Đồng thời, cần chuẩn hóa quy trình, đào tạo nhân lực, tăng cường kết nối đa phương thức và xây dựng cơ chế chia sẻ dữ liệu. Ví dụ, Cát Lái có thể ưu tiên giải pháp quản lý phương tiện và container để giảm ùn tắc; Cái Mép tập trung vào tự động hóa và quản lý năng lượng; Lạch Huyện ưu tiên kết nối logistics và tối ưu khai thác tàu. Bên cạnh đó, các cảng cần tăng cường bảo mật dữ liệu, an ninh mạng và kiểm soát phát thải trong toàn bộ quá trình vận hành.

7. THẢO LUẬN

Kết quả phân tích cho thấy phát triển cảng thông minh tại Việt Nam là cần thiết nhằm nâng cao năng lực khai thác, giảm chi phí logistics và cải thiện khả năng kết nối. Tuy nhiên, quá trình triển khai còn gặp hạn chế về hạ tầng số, dữ liệu, nhân lực và vốn đầu tư. Vì vậy, mô hình cần được triển khai theo lộ trình, kết hợp chuyển đổi số, tự động hóa, logistics thông minh và giảm phát thải.

8. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy phát triển cảng thông minh tại Việt Nam là xu hướng cần thiết nhằm nâng cao hiệu quả khai thác, giảm chi phí logistics và tăng năng lực cạnh tranh. Trên cơ sở phân tích thực trạng và SWOT, mô hình đề xuất tập trung kết hợp hạ tầng số, dữ liệu, IoT, AI, tự động hóa, kết nối logistics và quản lý môi trường. Việc triển khai cần thực hiện theo lộ trình từ số hóa, kết nối đến tự động hóa và thông minh hóa, phù hợp với điều kiện của từng cảng. Đồng thời, cần gắn chuyển đổi số với sử dụng năng lượng hiệu quả và giảm phát thải khí nhà kính. Qua đó, mô hình hướng tới xây dựng hệ thống cảng thông minh, hiệu quả, kết nối, xanh và bền vững, góp phần nâng cao chất lượng dịch vụ và năng lực logistics quốc gia.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thống kê hàng hóa qua các cảng biển Việt Nam. Internet: https://vimawa.gov.vn/vi/thong-ke (truy cập: tháng 8/2026).

[2] Vòng Thình Nam, Mai Văn Thành, Chu Thị Huệ. Phát triển cảng thông minh Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 01, tr. 114-116, 2026.

[3] Lê Văn Thức. Nghiên cứu, đề xuất giải pháp hình thành và phát triển cảng biển xanh - thông minh tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 12, 2025, doi: 10.64588/jc.04.12.2025.

■ Ngày nộp bài: 03/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/10/2026

Nghiên cứu bộ tự động điều khiển cập cầu trượt sửa lỗi cho tàu biển sử dụng bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi

Fault-tolerant sliding auto-berthing controller for marine surface vessel with adaptive sliding mode disturbance observer

> TS VŨ SƠN TÙNG*, THS VŨ ĐỨC TOÀN
Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: vusontung@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Các tình huống xảy ra lỗi trong quá trình điều khiển như lỗi kẹt cơ cấu chấp hành, lỗi suy giảm hiệu năng điều khiển của cơ cấu chấp hành, lỗi cảm biến, lỗi bất định là thách thức lớn trong quá trình nghiên cứu các bộ điều khiển tự động cập cầu cho tàu biển. Bài báo đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi tự động cập cầu tích hợp bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi cho tàu biển đủ cơ cấu chấp hành. Luật thích nghi hệ số khuếch đại trong bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi được thiết kế cho cả hai điều kiện điều khiển không có lỗi và khi xảy ra lỗi. Trong điều kiện điều khiển không có lỗi, bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi đảm bảo quan sát được các nhiễu tác động thay đổi chậm và giữ hệ số khuếch đại ở giá trị nhỏ. Trong điều kiện điều khiển khi lỗi xảy ra, hệ số khuếch đại được điều chỉnh nhanh chóng theo sự thay đổi đột ngột và lớn của nhiễu tác động. Bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi được tích hợp vào bộ điều khiển trượt theo mặt trượt tốc độ để tự động điều khiển tàu cập cầu. Chất lượng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất được đánh giá qua các mô phỏng với các điều kiện điều khiển khi xảy ra lỗi và không xảy ra lỗi.

Từ khóa: Điều khiển trượt sửa lỗi; tàu đủ cơ cấu chấp hành; bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi.

ABSTRACT

Fault scenarios in control, such as actuator stuck, actuator control performance degradation, sensor faults and uncertainty faults, are major challenges in research on auto-berthing controllers for marine surface vessels. This paper proposes a fault-tolerant sliding-mode auto-berthing controller integrated with an adaptive sliding mode disturbance observer (ASMDO) for a fully actuated marine surface vessel. The adaptive gain law of the ASMDO is designed for both fault-free and faulty control conditions. Under fault-free control conditions, the ASMDO can observe slowly varying disturbances and keep the observer gain small. Under faulty control conditions, the observer gain is rapidly adjusted to accommodate sudden and large changes in disturbances. The ASMDO is integrated into a sliding-mode controller based on a velocity sliding surface to automatically control the vessel during berthing. The control performance of the proposed controller is evaluated through simulations under both faulty and fault-free control conditions.

Keywords: Fault-tolerant sliding mode control; fully actuated marine surface vessel; adaptive sliding mode disturbance observer.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong điều khiển tự động, lỗi được xác định là một sai lệch không được cho phép ra khỏi điều kiện hoạt động thông thường của ít nhất một tham số hoặc một đặc tính đặc trưng của hệ thống. Về cơ bản, hầu hết các kỹ thuật điều khiển tự động cổ điển đều giả định rằng các thành phần trong hệ thống đều hoạt động tốt và bộ điều khiển hoạt động dựa trên giả định này. Do đó, lỗi xảy ra trong thành phần của hệ thống sẽ gửi thông tin sai lệch tới bộ điều khiển và kết quả dẫn tới bộ điều khiển hoạt động sai lệch do thông tin sai lệch nhận được. Trong quá trình điều khiển tự động, lỗi có thể xảy ra do nhiều nguyên nhân khác nhau bao gồm: Gián đoạn kết nối giữa cảm biến/cơ cấu chấp hành và bộ điều khiển do rung lắc, kết nối kém hoặc ngắn mạch, chậm trễ do tốc độ đường truyền; sụt điện áp cấp cho cảm biến/cơ cấu chấp hành điện; cơ cấu chấp hành bị kẹt hoặc suy giảm hiệu năng. Thông thường, lỗi sẽ xuất hiện đột ngột dẫn tới tham số của hệ thống bị thay đổi nhanh và đột ngột hơn quá trình điều khiển thông thường. Bộ điều khiển có khả năng tự động bù lỗi xảy ra trong hệ thống, đồng thời duy trì

ổn định và chất lượng điều khiển trong phạm vi cho phép được gọi là một bộ điều khiển sửa lỗi FTC.

Hiện nay, các nhà khoa học trên thế giới đã có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau để thiết kế bộ điều khiển sửa lỗi cho các đối tượng điều khiển khác nhau như: Cánh tay robot [1], phương tiện hàng hải [2], phương tiện bay [3, 4], công nghệ vũ trụ [5] và các hệ thống khác [6, 7]. Trong nghiên cứu điều khiển tự động các phương tiện hàng hải, hiện có một số nghiên cứu về điều khiển sửa lỗi trong điều khiển bám quỹ đạo tàu biển. Nhóm tác giả trong nghiên cứu [8] đã sử dụng bộ quan sát nhiễu phi tuyến, kỹ thuật cuốn chiếu và hàm tan chặn Lyapunov để điều khiển tàu bám đường trong điều kiện lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển. Nghiên cứu [9] đã đề xuất một bộ quan sát bù thông số không xác định với luật bảo vệ thích nghi được thiết kế để phát hiện và nhận dạng lỗi trong trường hợp xảy ra lỗi trong độ lớn và tốc độ của cơ cấu chấp hành và lỗi trong mô hình cơ cấu chấp hành như kẹt, giảm hiệu suất trong quá trình điều khiển bám quỹ đạo. Tuy nhiên, hiện nay có rất ít nghiên cứu điều khiển sửa lỗi trong quá trình cập cầu cho tàu biển. Hầu hết các nghiên cứu điều khiển sửa lỗi cho các phương tiện hàng hải chủ yếu tập trung giải quyết lỗi cơ cấu chấp hành với hai hướng giải pháp chính: Phân bổ tín hiệu điều khiển và điều khiển thích nghi. Nghiên cứu [10] đã đề xuất một ma trận trọng số chân vịt để phân bổ tín hiệu điều khiển khi lỗi cơ cấu chấp hành xảy ra trong quá trình điều khiển thiết bị dưới nước tự hành. Các nghiên cứu [11] và [12] đề xuất các bộ điều khiển thích nghi để giải quyết một lượng lớn các lỗi của chân vịt hoặc lỗi trễ tín hiệu. Trong nghiên cứu [13], nhóm nghiên cứu đã kết hợp phương pháp điều khiển mô hình dự đoán MPC dựa trên giới hạn lắc, lý thuyết ổn định Lyapunov và các bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI để giải quyết lỗi của cảm biến trong quá trình điều khiển tàu. Nghiên cứu [14] đã thiết kế một bộ ước lượng lặp thích nghi để ước lượng độ chính xác cho lỗi cảm biến và một bộ ước lượng lỗi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để xấp xỉ lỗi cơ cấu chấp hành cho tàu tự hành.

Nghiên cứu này sẽ đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi tích hợp bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi để giải quyết bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện có lỗi xảy ra với các nguyên nhân khác nhau như lỗi cơ cấu chấp hành, lỗi cảm biến và lỗi bất định. Hiệu quả của bộ điều khiển được chứng minh thông qua mô phỏng máy tính với điều kiện khi không có lỗi và khi có lỗi xảy ra.

2. MÔ HÌNH TOÁN CHUYỂN ĐỘNG CỦA TÀU THEO 3 BẬC TỰ DO TRÊN MẶT PHẲNG NẰM NGANG

Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang được sử dụng để giải quyết cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu bao gồm 3 chuyển động: Chuyển động theo trục dọc tàu (Surge); chuyển động dịch chuyển ngang (Sway) và chuyển động xoay (Yaw).

Nghiên cứu sử dụng mô hình toán động lực học 3 bậc tự do trên chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu theo tài liệu [15] như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C(v)v + Dv = u + \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

$\eta = [x\ y\ \psi]^T$ là vector thể hiện vị trí tàu *(x,y)* và hướng mũi tàu ψ; $\upsilon = [u\ v\ r]^T$ là tốc độ tiến lùi *u*, tốc độ dạt ngang *v*, tốc độ quay *r* trong hệ tọa độ tàu; $J(\eta)$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa tâm:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

M là ma trận quán tính của tàu; *C(v)* là ma trận Coriolis và hướng tâm của tàu; *D* là ma trận giảm chấn thủy động lực học; *u* là vector lực và mô-men gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu. Nếu tàu đủ cơ cấu chấp hành, $u = [u_1\ u_2\ u_3]^T$ với u_1, u_2 và u_3 là tín hiệu điều khiển từ 3 cơ cấu chấp hành để thực hiện điều khiển trên ba trục tốc độ *u, v,* r; $\varepsilon = [\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \varepsilon_3]^T$ là vector lực và mô-men do nhiễu tác động với ε_1 là nhiễu tác động lên chuyển động theo trục dọc của tàu, ε_2 là nhiễu tác động lên chuyển động dịch chuyển ngang của tàu, ε_3 là nhiễu tác động lên chuyển động xoay của tàu.

3. THIẾT KẾ BỘ TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN CẬP CẦU TRƯỢT SỬA LỖI CHO TÀU BIỂN SỬ DỤNG BỘ QUAN SÁT NHIỄU TRƯỢT THÍCH NGHI

3.1. Thiết kế bộ điều khiển

Bộ điều khiển được đề xuất sẽ sử dụng mặt trượt tốc độ để đảm bảo đưa tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ để cập cầu tàu. Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển và giải quyết tác động khi có lỗi xảy ra trong quá trình điều khiển, ta chia thành 3 bước sau:

- Bước thứ nhất thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_{ref}, v_{ref}, r_{ref}) từ vị trí và hướng mũi tàu mong muốn (x_{ref}, y_{ref}, ψ_{ref}) dựa trên quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_{ref}, v_{ref}, r_{ref}) được thiết kế sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu tiến dần về 0 trong thời gian hữu hạn. Yêu cầu của bước này là tại vị trí cập cầu, tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) bằng 0.

Thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay mong muốn (u_{ref}, v_{ref}, r_{ref}) như sau:

$$\begin{bmatrix} uref \\ vref \\ rref \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} - \tanh(l_1 ex) \\ \dot{y}ref - \tanh(l_2 ey) \\ \dot{\psi}ref - \tanh(l_3 e\psi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó: l_1, l_2, $l_3 > 0$ là các hệ số điều khiển có giá trị dương; e_x, e_y, e_ψ là sai số giữa vị trí tàu, hướng tàu và vị trí, hướng tàu mong muốn.

Nếu sai số tốc độ giữa tốc độ tàu và tốc độ mong muốn tiến đến 0 thì sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu sẽ tiến đến 0 trong thời gian hữu hạn.

- Bước thứ hai sử dụng lý thuyết điều khiển trượt để thiết kế luật điều khiển để đảm bảo đưa được tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi thực tế của tàu đến giá trị mong muốn.

Mặt trượt thiết kế như sau:

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_{ref} \\ v - r_{ref} \\ r - r_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = e \quad (3)$$

Dựa trên lý thuyết điều khiển trượt, tín hiệu điều khiển hệ thống *u* bao gồm thành phần tín hiệu điều khiển tương đương giữ tốc độ trên mặt trượt u_n và tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh u_{sw} như sau:

$$u_c = u_n + u_{sw} \quad (4)$$

$$u_n = C(v)v + Dv + M\dot{v}_d - \hat{\varepsilon} \quad (5)$$

$$u_{sw} = -\tanh(k_c s) \quad (6)$$

Trong đó: $\hat{\varepsilon}$ là xấp xỉ của nhiễu tác động được xác định bởi bộ quan sát nhiễu; k_c là hệ số khuếch đại của bộ điều khiển.

- Bước thứ ba: Để đảm bảo điều khiển được tàu trong điều kiện không có lỗi với nhiễu tác động ít thay đổi và trong điều kiện xuất hiện lỗi dẫn tới nhiễu tác động lớn và thay đổi nhanh, nghiên cứu đã đề xuất một bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi để xấp xỉ

nhiễu tác động $\varepsilon = [\,\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \varepsilon_3]^T$. Luật thích nghi hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi được thiết kế cho cả hai điều kiện điều khiển khi không có lỗi và khi lỗi xảy ra. Trong điều kiện không có lỗi hay nhiễu tác động nhỏ và ít thay đổi, để giảm hiện tượng chattering của giá trị được quan sát bộ điều khiển cần đảm bảo giữ hệ số khuếch đại ở giá trị thấp. Khi lỗi đột ngột xảy ra, nhiễu tác động thường lớn và thay đổi đột ngột. Hệ số khuếch đại cần được tăng đủ lớn hơn để xấp xỉ được giá trị nhiễu tác động bị thay đổi.

Bộ quan sát nhiễu được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{\varepsilon}} = -\tanh(k_o s) \tag{7}$$

Trong đó: k_o là hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu.

Hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu được xác định bằng luật thích nghi hệ số khuếch đại như sau như sau:

$$\begin{cases} k_o, |s| \le \delta \\ \dot{k}_o = \lambda_f |s|, |s| > \delta \end{cases} \tag{8}$$

Trong đó: λ_f là tốc độ điều chỉnh của bộ quan sát nhiễu khi có xảy ra lỗi; δ là giá trị giới hạn của nhiễu tác động được dự kiến trước.

3.2. Kết quả mô phỏng và phân tích

Nhóm tác giả thực hiện mô phỏng sử dụng mô hình tàu "Cyber ship II" để đánh giá chất lượng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất. Mô hình tàu "Cyber ship II" là bản sao tỉ lệ 1:70 của một tàu đủ cơ cấu chấp hành được phát triển bởi Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Nauy.

Vị trí ban đầu của tàu như sau: *x(0) = 0 L, y(0) = 0 L, ψ(0) = π/6, u(0) = 0,25 m/s, v(0)=0 m/s, r(0)=0 m/s* (L là chiều dài tàu).

Vị trí cập cầu của tàu như sau: *x(b) = 40 L, y(b) = 10 L, ψ(b) = 0, u(b) = 0 m/s, v(b)=0 m/s, r(b)=0 m/s.*

Nhiễu tác động trong quá trình điều khiển khi không có lỗi như sau:

$$\varepsilon_1 = 0{,}01 * (\sin(0{,}4 * t) + \cos(0{,}6 * t))$$

$$\varepsilon_2 = 0{,}01 * (\sin(0{,}5 * t) + \cos(0{,}3 * t))$$

$$\varepsilon_3 = 0{,}01 * (\sin(0{,}3 * t) + \cos(0{,}2 * t))$$

Giả sử trong quá trình điều khiển, lỗi xảy ra với cơ cấu chấp hành hoặc cảm biến lỗi tại thời điểm t=100s dẫn tới nhiễu tác động thay đổi đột ngột như sau:

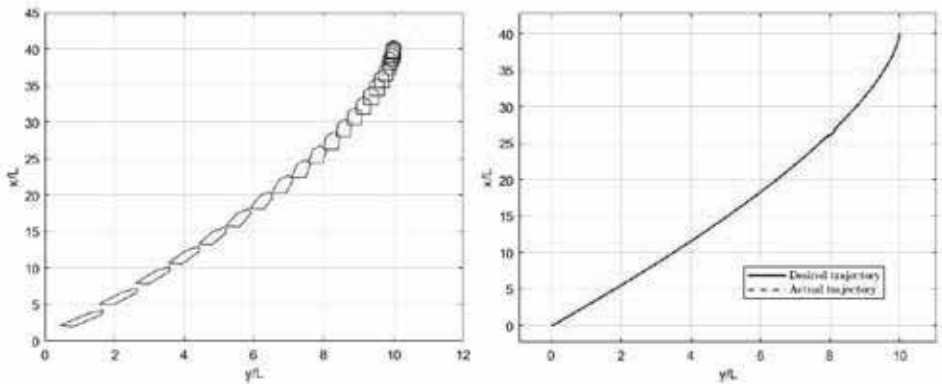
$$\varepsilon_1 = -1{,}5 - 2{,}4 * u * u - 3{,}6 * \sin(u * v) + 0{,}01 * (\sin(0{,}4 * t) + \cos(0{,}6 * t))$$

$$\varepsilon_2 = 1{,}6 + 2{,}8 * u * u + 2{,}2 * \cos v + 0{,}01 * (\sin(0{,}5 * t) + \cos(0{,}3 * t))$$

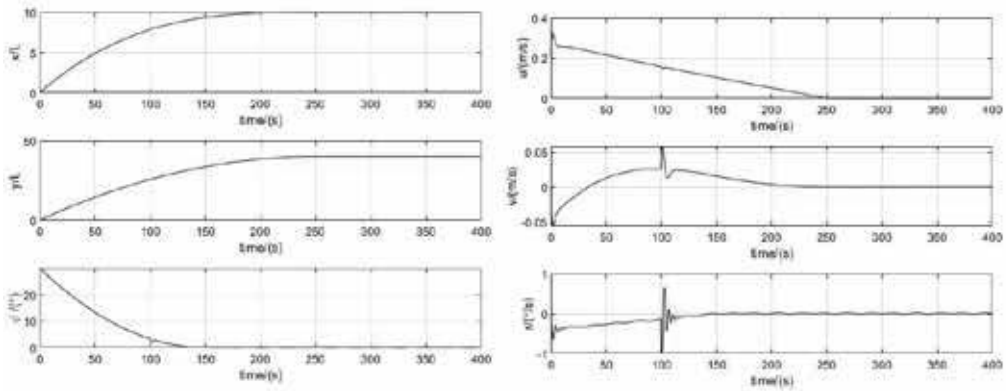
$$\varepsilon_3 = -1{,}1 - 3.3 * r * r * r + 0{,}01 * (\sin(0{,}3 * t) + \cos(0{,}2 * t))$$

Hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi được lựa chọn như sau (0,1 0,1 0,1).

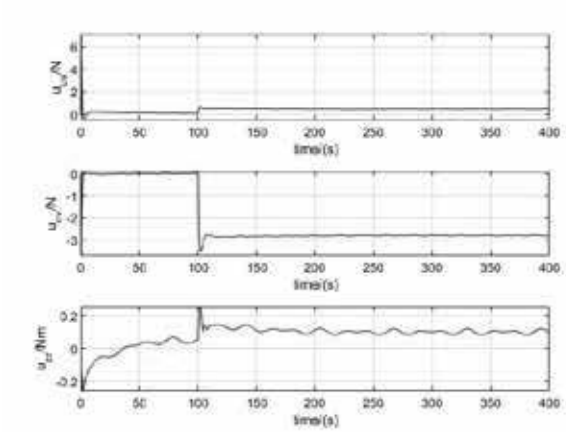
Hình 1-2 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có thể điều khiển được tàu cập cầu vị trí dự kiến tại thời điểm 250s mặc dù trong điều kiện xuất hiện lỗi dẫn tới nhiễu tác động thay đổi đột ngột từ thời điểm 100s. Trên Hình 2, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới và duy trì tại 0 từ 150s. Trong Hình 2, vận tốc tiến lùi được điều khiển giảm dần từ 0,25 m/s đến và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc dạt ngang tăng lên và duy trì tại 0,03 m/s, trước khi tăng lên đột ngột đến 0,06m/s tại 110s khi xảy ra lỗi, sau đó được điều chỉnh giảm dần về 0 tại 270s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 0,5°/s sau đó giảm dần, tại 100s do lỗi xảy ra dẫn tới vận tốc quay bị dao động nhưng sau đó được điều khiển ổn định về 0. Hình 3 thể hiện tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trên các 3 trục chuyển động. Tại thời điểm 100s khi xảy ra nhiễu tác động lớn do ảnh hưởng của lỗi, các tín hiệu điều khiều khiển nhanh chóng thích nghi và điều chỉnh thích hợp. Theo Hình 4, bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi có khả năng duy trì xấp xỉ được nhiễu tác động trong cả điều kiện không xảy ra lỗi và trong điều kiện lỗi xảy ra. Hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi được đảm bảo duy trì ở 0,1 trong điều kiện không có lỗi giảm ảnh hưởng của hiện tượng chattering và được tăng lên đáng kể tương ứng khi xảy ra lỗi để xử lý ảnh hưởng của nhiễu tác động lớn.



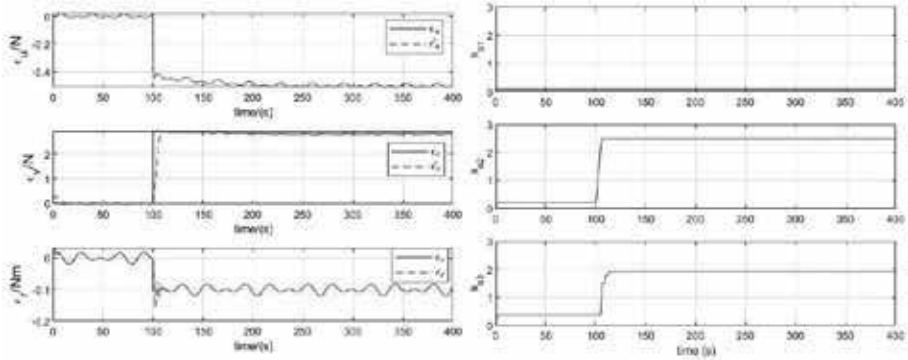
Hình 1. Quỹ đạo cập cầu của tàu



Hình 2. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ và đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u, tốc độ dạt ngang v, tốc độ quay r của tàu



Hình 3. Đồ thị tín hiệu điều khiển



Hình 4. So sánh vector nhiễu tác động $\bar{\tau}_d$ và vector xấp xỉ của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi $\hat{\bar{\tau}}_d$, đồ thị hệ số khuếch đại của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, một bộ điều khiển trượt sửa lỗi tích hợp bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi tự động điều khiển cập cầu cho tàu biển giải quyết được lỗi xuất hiện bất ngờ và nghiêm trọng trong quá trình điều khiển. Kết quả mô phỏng Matlab cho thấy tính ổn định và hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất, đạt được yêu cầu điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện không xảy ra lỗi và khi lỗi xảy ra. Khả năng nhận dạng nhiễu tác động của bộ quan sát nhiễu trượt thích nghi đã được chứng minh. Ngoài ra, bộ điều khiển không chỉ đảm bảo khả năng bám quỹ đạo cập cầu dự kiến mà còn có thể đảm bảo hệ số khuếch đại bộ quan sát ở mức nhỏ để giảm ảnh hưởng của hiện tượng chattering khi hệ thống quay trở lại ổn định.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A Milecki, P Novak. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators. Applied Sciences, no. 4, p. 2675, Feb 2023, doi: https://doi.org/10.3390/app13042675.

[2] C Liu, V Filaretov, A Zuev, A Protsenko, A Zhirabok. Fault Tolerant Control in Underwater Vehicles. Journal of Marine Science and Engineering, no. 12, p. 295, Oct 2024, doi: https://doi.org/10.3390/jmse12101836.

[3] Y Geng, B Wang, X Liu. Nonlinear Back-stepping Fault-Tolerant Controllers with Extended State Observers for Aircraft Wing Failures. Actuators, no. 14, p. 206, Apr 2025, doi: https://doi.org/10.3390/act14050206.

[4] S Zeghlache, K Kara, D Saigaa. Fault tolerant control based on interval type-2 fuzzy sliding mode controller for coaxial trirotor aircraft. ISA Transactions, no. 59, pp. 215-231, Nov 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.09.006.

[5] M N Hasan, M Haris, S Qin. Fault-tolerant spacecraft attitude control: A critical assessment. Progress in Aerospace Sciences, no. 130, p. 100806, Apr 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100806.

[6] M Moradi, A Chaibakhsh, A Ramezani. An intelligent hybrid technique for fault detection and condition monitoring of a thermal power plant. Applied Mathematical Modelling, no. 60, pp. 34-47, Aug 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.002.

[7] Lê Anh Tuấn, Lê Đại Dương. Neural fractional-order control of telescopic truck cranes. Applied Mathematical Modelling, no. 108, pp. 807-824, Aug 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.04.006.

[8] Z Zheng, L Sun, L Xie. Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel with Actuator Saturation and Faults. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, no. 48, pp. 1794-1805, Oct 2018, doi: https://doi.org/ 10.1109/TSMC.2017.2717850.

[9] C Liu, X Zhao, X Wang, X Ren. Adaptive fault identification and reconfigurable fault-tolerant control for unmanned surface vehicle with actuator magnitude and rate faults. International Journal of Robust and Nonlinear Control, no. 33, pp. 5463-5483, Jul 2023, doi: https://doi.org/10.1002/rnc.6653.

[10] T Lv, J Zhou, Y Wang, W Gong, M Zhang. Sliding mode based fault tolerant control for autonomous underwater vehicle. Ocean Engineering, no. 216, p. 107855, Nov 2020, doi: https://doi.org/ 10.1016/j.oceaneng.2020.107855.

[11] J Zhang, S Yu, Y Yan. Fixed-time velocity-free sliding mode tracking control for marine surface vessels with uncertainties and unknown actuator faults. Ocean Engineering, no. 201, p. 107107, Apr 2020, doi: https://doi.org/ 10.1016/j.oceaneng.2020.107107.

[12] J Zhang, S Yu , Y Yan, D Wu. Fixed-time output feedback sliding mode tracking control of marine surface vessels under actuator faults with disturbance cancellation. Applied Ocean Research, no. 104, p. 102378, Nov 2020, doi: https://doi.org/ 10.1016/j.apor.2020.102378.

[13] Y Zheng, Z Liu, L Liu. Robust MPC-Based Fault-Tolerant Control for Trajectory Tracking of Surface Vessel. IEEE Access, no. 6, pp. 14755-14763, Feb 2018, doi: https://doi.org/ 10.1109/ACCESS.2018.2817345.

[14] L Chen, M Liu, Y Shi, H Zhang, E Zhao. Adaptive Fault Estimation for Unmanned Surface Vessels with a Neural Network Observer Approach. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, no. 68, pp. 416-425, Jan 2021, doi: https://doi.org/ 10.1109/TCSI.2020.3033803.

[15] T I Fossen. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons Ltd, 2011, doi: https://doi.org/ 10.1002/9781119994138.

■ Ngày nộp bài: 10/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 17/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2026

Ứng dụng phương pháp phân đoạn hình học sử dụng dữ liệu GIS từ nguồn bản đồ mở xác định yếu tố hình học đường bộ

Application of geometric segmentation method using open-source GIS data to determine road alignment geometric elements

> PGS.TS TRẦN THỊ KIM ĐĂNG*, TS NGUYỄN TRỌNG DŨNG
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
*Email: dangttk@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Khảo sát hiện trạng trong giai đoạn chuẩn bị đầu tư (Pre-FS, đề xuất dự án) bằng phương pháp truyền thống thường tốn kém và mất nhiều thời gian, trong khi nguồn kinh phí giai đoạn này rất hạn hẹp. Bài báo đề xuất phương pháp tự động ước tính các yếu tố hình học đường bộ từ tọa độ GIS nguồn mở (OpenStreetMap) thông qua kỹ thuật phân đoạn hình học, kết hợp thuật toán làm mượt và hiệu chỉnh theo tiêu chuẩn TCVN 4054. Thử nghiệm trên 16 đoạn quốc lộ và cao tốc đại diện tại Việt Nam cho thấy phương pháp có tính khả thi cao, mở ra hướng tiếp cận chi phí thấp để khai thác tài nguyên dữ liệu mở phục vụ chuẩn bị dự án và quản trị hạ tầng giao thông.

Từ khóa: OpenStreetMap; GIS, phân đoạn hình học; chỉ tiêu hình học đường bộ; TCVN 4054; tối ưu hóa ngưỡng.

ABSTRACT

Conventional surveying during the preliminary project preparation stage (Pre-FS or project proposals) is time-consuming and costly, especially when initial funding is limited. This paper proposes an automated approach to estimate road geometric elements from OpenStreetMap (OSM) GIS data by integrating geometric segmentation with smoothing algorithms calibrated against TCVN 4054 standards. Evaluated across 16 representative national highway and expressway sections in Vietnam, the results demonstrate high feasibility, opening a cost-effective pathway to leverage open geospatial data for preliminary road design and infrastructure management.

Keywords: OpenStreetMap; GIS; geometric segmentation; road geometric design criteria; TCVN 4054, threshold optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong giai đoạn chuẩn bị đầu tư (lập Pre-FS hoặc đề xuất dự án nâng cấp, mở rộng), việc đánh giá hiện trạng tuyến đóng vai trò quyết định đến phương án kỹ thuật và tổng mức đầu tư. Dù chưa yêu cầu thiết kế chi tiết, giai đoạn này cần thu thập nhanh các thông số hình học tuyến trên diện rộng. Tuy nhiên, khảo sát thực địa hay mua dữ liệu địa hình chính thức thường tốn kém và mất nhiều thời gian. Sự phát triển của dữ liệu không gian mở như OpenStreetMap (OSM) kết hợp kỹ thuật GIS mở ra tiềm năng trích xuất tự động yếu tố hình học tuyến phục vụ lập phương án sơ bộ.

Nghiên cứu này hướng tới 3 mục tiêu chính: (1) Trích xuất chuỗi tọa độ tim đường từ OSM với bước lấy mẫu 20 m; (2) xây dựng phương pháp luận và bộ lọc khử nhiễu dữ liệu GIS thô để phân tách chính xác các đoạn thẳng và đoạn cong; (3) thử nghiệm và đánh giá trên 16 tuyến đường thực tế tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu không chỉ đóng góp giải pháp học thuật về khôi phục hình học tuyến từ bản đồ số, mà còn định hướng quy trình khảo sát sơ bộ ứng dụng tài nguyên mở.

2. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU TRÍCH XUẤT YẾU TỐ HÌNH HỌC ĐƯỜNG BỘ TỪ DỮ LIỆU GIS/OSM

Thông số hình học tuyến (bán kính cong, góc chuyển hướng, độ dốc dọc, siêu cao) là cốt lõi trong quản trị hạ tầng, nơi cơ quan quản lý thường đối mặt bài toán chuẩn hóa dữ liệu lớn [1, 2]. Đo đạc truyền thống tốn kém, trong khi hồ sơ lưu trữ thường phân tán hoặc sai lệch sau nhiều kỳ bảo trì.

Dữ liệu bản đồ mở (OpenStreetMap) [3, 4] và GIS cung cấp mạng lưới đường toàn cầu miễn phí, liên tục. Cùng với đó, viễn thám vệ tinh và UAV ứng dụng học máy trên ảnh Sentinel-2 [5, 6], ảnh độ phân giải cao [7] hay LiDAR [8] hỗ trợ tự động bóc tách mạng lưới. Tại Việt Nam, ảnh UAV [9] và viễn thám GIS [10, 11] chứng minh hiệu quả trong lập cơ sở dữ liệu đường bộ; GIS cũng tối ưu khi mô phỏng

giao thông đô thị [12]. Dù vậy, địa hình hiểm trở với bóng đổ và thảm che phủ thường gây nhiễu tọa độ trích xuất [13].

Thách thức cốt lõi là bản đồ số chỉ cung cấp điểm rời rạc hoặc đa tuyến, không chứa sẵn thông số thiết kế (α, R, L_s, i_d). Để giải quyết, nhiều nghiên cứu đã nhận diện đường cong nằm trực tiếp từ GIS/OSM [14]. Bartin và CS (2019) [15] dùng thuật toán phân cụm không gian theo góc phương vị để khử nhiễu. Tiếp cận chi phí thấp, cảm biến quán tính smartphone cũng được ứng dụng xác định bán kính cong [16] và siêu cao [17].

Các nghiên cứu hiện nay còn có hạn chế: (1) Chủ yếu trích xuất bình đồ phẳng 2D (R, α), tách rời trắc dọc (i_d) từ mô hình số độ cao (DEM) [14, 15]; (2) Thuật toán phân cụm chủ yếu quy khúc cua về một cung tròn đơn, chưa bóc tách tường minh cấu trúc ba phân đoạn (chuyển tiếp vào - cong tròn - chuyển tiếp ra) theo quy chuẩn thiết kế cấp đường V≥ 60 km/h; (3) Thường xử lý các khúc cong độc lập nên dễ nhầm lẫn các đường cong liên tiếp; (4) Phạm vi kiểm chứng chủ yếu giới hạn ở vài tuyến đơn lẻ hoặc đô thị, chưa đánh giá đồng bộ trên mạng lưới liên vùng đa dạng từ đường đèo dốc miền núi đến cao tốc.

3. PHƯƠNG PHÁP LUẬN XỬ LÝ SỐ LIỆU VÀ XÁC ĐỊNH YẾU TỐ HÌNH HỌC ĐƯỜNG BỘ

3.1. Trích xuất bộ dữ liệu

Cấu trúc hình học tuyến được thu thập và tiền xử lý tự động bằng Python, bao gồm:

- Khởi tạo và truy xuất dữ liệu định tuyến:

Thiết lập phạm vi nghiên cứu từ cặp tọa độ điểm đầu - cuối theo hệ chuẩn WGS84. Dữ liệu định tuyến được truy xuất qua API của hệ thống Open Source Routing Machine (OSRM) thay vì truy vấn trực tiếp cơ sở dữ liệu OSM, giúp tối ưu băng thông và tránh quá tải hệ thống khi xử lý tuyến dài.

- Tối ưu tham số truy vấn và kiểm soát lỗi:

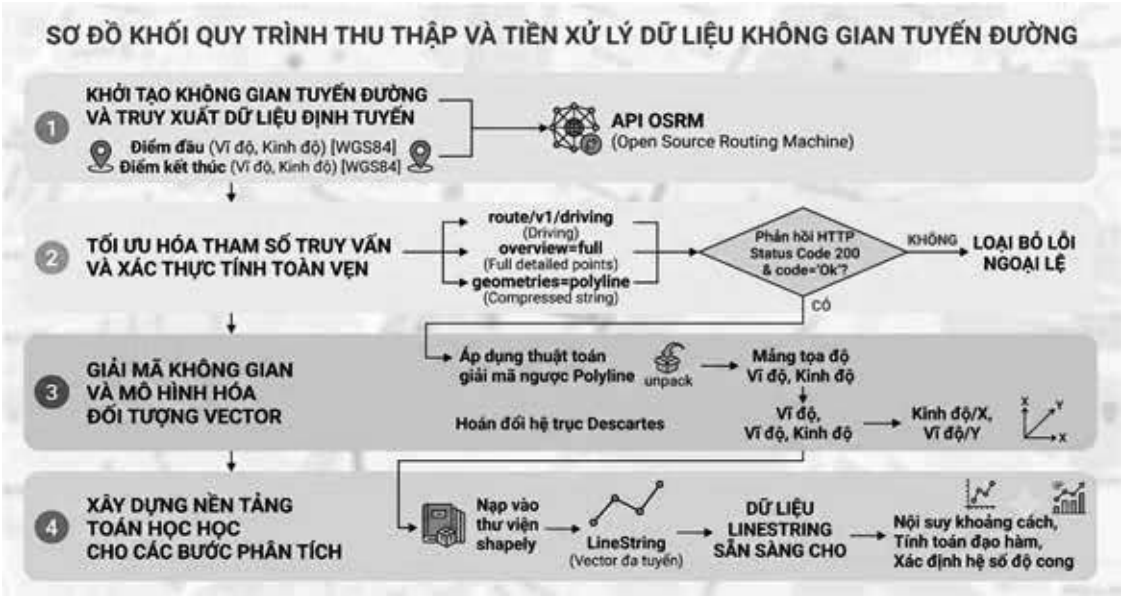
Lệnh gọi API sử dụng giao thức xe cơ giới (*route/v1/driving*) kèm tham số *overview=full* để lấy trọn vẹn các nút chi tiết và cấu hình *geometries=polyline* để nhận chuỗi nén giúp giảm dung lượng gói tin và tăng tốc độ truyền tải. Thuật toán chỉ tiếp nhận các phản hồi hợp lệ (HTTP 200 và mã nội bộ OSRM (*code='Ok'*) để loại trừ lỗi ngoại lệ.

- Giải mã chuỗi không gian và chuẩn hóa tọa độ:

Chuỗi polyline từ JSON được giải mã ngược thành mảng tọa độ địa lý bám sát quỹ đạo tuyến. Mảng dữ liệu sau đó được hoán đổi từ định dạng bản đồ (Vĩ độ, Kinh độ) sang hệ trục Descartes phẳng (X/Kinh độ, Y/Vĩ độ) nhằm phục vụ các phép tính hình học vi phân và GIS.

- Mô hình hóa đối tượng vector tuyến:

Tập hợp tọa độ chuẩn hóa (X, Y) được nạp vào thư viện *shapely* để khởi tạo đối tượng đa tuyến liên tục (*LineString*). Cấu trúc vector liền mạch này là cơ sở toán học để thực hiện các giải thuật tiếp theo như nội suy khoảng cách lấy mẫu và tính đạo hàm xác định độ cong tại mọi vị trí trên tuyến.



Hình 1. Quy trình thu thập và tiền xử lý số liệu không gian tuyến đường

Nguồn: Nhóm nghiên cứu thiết lập sử dụng hỗ trợ AI.

3.2. Các bước xử lý và phân tích số liệu

3.2.1. Xác định điểm đối hướng và tính góc chuyển hướng

Bình đồ tuyến được khôi phục từ chuỗi tọa độ và góc phương vị giữa các điểm kế tiếp theo [18].

Với hai điểm đo liên tiếp P_i (Lat_i, Lng_i) và P_{i+1} (Lat_{i+1}, Lng_{i+1}), đổi tọa độ ra radian theo công thức (1).

$$\varphi_i = Lat_i \times \frac{\pi}{180}, \quad \lambda_i = Lng_i \times \frac{\pi}{180} \tag{1}$$

Chênh lệch kinh độ (công thức 2):

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i \tag{2}$$

Với giả thiết trái đất là hình cầu, góc phương vị ban đầu từ P_i đến P_{i+1} được xác định theo (3)

$$\alpha_i = atan2(A_i, B_i) \tag{3}$$

Trong đó:

$A_i = sin(\Delta\lambda_i)\, cos\, \varphi_{i+1}$

$B_i = cos\, \varphi_i\, sin\, \varphi_{i+1} - sin\, \varphi_i\, cos\, \varphi_{i+1}\, cos(\Delta\lambda_i)$

Chuyển đổi góc sang độ và chuẩn hóa về khoảng (0° ÷ 360°) theo (4):

$$\theta_i = (\alpha_i \times \frac{180°}{\pi})\, mod\, 360° \tag{4}$$

Phép modulo (mod) được hiểu là phép lấy phần dư không âm. Tại điểm P_i, đoạn đi vào là $P_{i-1}P_i$, còn đoạn đi ra là P_iP_{i+1}. Với khoảng

cách ngắn giữa các điểm đo, góc lệch hướng (góc chuyển hướng) được tính gần đúng bằng hiệu góc phương vị theo (5).

$$\Delta\theta_i = [(\theta_i - \theta_{i-1} + 180°)\ mod\ 360°] - 180° \quad (5)$$

Dấu của $\Delta\theta_i$ chỉ rõ hướng rẽ: $\Delta\theta_i > 0$: rẽ phải; $\Delta\theta_i < 0$: rẽ trái; $\Delta\theta_i = 0$: đi thẳng.

Để khắc phục sai số đảo chiều trên đường cong quanh co, góc chuyển hướng của toàn đoạn cong được tính bằng tổng các góc lệch hướng vi mô (6):

$$\alpha = \sum_1^{j \in đoạn\ cong} \Delta\theta_j \quad (6)$$

3.2.2. Thuật toán khớp đường tròn

Để ước tính bán kính thô (R_{fit}) và tọa độ tâm (x_c, y_c), phương trình đường tròn phẳng được tuyến tính hóa theo (7).

$$(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2 = R^2 \quad (7)$$

Khai triển và đặt $C = R^2 - x_c^2 - y_c^2$, ta có (8):

$$2x_j x_c + 2y_j y_c + C = {x_j}^2 + {y_j}^2 \quad (8)$$

Với n điểm đo, bài toán đưa về hệ tuyến tính A w ≈ b (9), với:

$$w = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ C \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 1 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} {x_1}^2 + {y_1}^2 \\ {x_2}^2 + {y_2}^2 \\ \vdots \\ {x_n}^2 + {y_n}^2 \end{bmatrix}$$

Vector tham số tối thiểu hóa tổng bình phương phần dư đại số (9):

$$\hat{w} = arg\ min_w \|A\ w - b\|_2^2 \quad (9)$$

Ký hiệu ŵ biểu thị vector tham số ước lượng. Nghiệm bình phương tối thiểu biểu diễn qua giả nghịch đảo Moore-Penrose (giải bằng phân rã QR hoặc SVD) như ở (10).

$$\hat{w} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (10)$$

Bán kính ước lượng được tính theo (11):

$$R_{fit} = \sqrt{\hat{C} + {\hat{x}_c}^2 + {\hat{y}_c}^2} \quad (11)$$

Độ sai lệch theo phương bán kính và sai số căn trung bình bình phương (RMSE) hình học (12) và (13):

$$e_j = \sqrt{(x_j - \hat{x}_c)^2 + (y_j - \hat{y}_c)^2} - R_{fit} \quad (12)$$

$$RMSE_r = \sqrt{(1/n) \sum {e_j}^2} \quad (13)$$

Để phù hợp thực tế thiết kế, R_fit được làm tròn về giá trị tiêu chuẩn chẵn gần nhất theo TCVN 4054:2005 qua toán tử neo lưới (14).

$$R_{std} = argmin_{\{R_i\ in\ S\}} |R_{fit} - R_i| \quad (14)$$

Với S = {150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 8000, 10000} (mét). Nếu $R_{fit} > R_{gh}$, được coi là đường thẳng. Thuật toán tự động khử các đoạn cong ảo do nhiễu GPS (khi bán kính nhỏ hơn bán kính tối thiểu tuyệt đối của cấp đường) và loại bỏ các khúc cong có ≥70° tại nút giao rẽ nhánh.

3.2.3. Bóc tách phân đoạn đường tròn và đường cong chuyển tiếp

Với tuyến có tốc độ thiết kế $V_{tk} \geq 60$ km/h, các đường cong có bán kính nhỏ hơn bán kính không bố trí chuyển tiếp R_{kct} được mặc định chèn đường cong chuyển tiếp chiều dài Ls ở hai đầu. Nếu chiều dài đoạn cong. Nếu chiều dài toàn bộ đường cong ≤ 2Ls, đỉnh chuyển tiếp chia đôi đoạn cong và không tồn tại cung tròn giữa.

3.2.4. Phân đoạn trắc dọc bằng thuật toán Ramer-Douglas-Peucker (RDP)

Cao độ trích xuất từ DEM dạng răng cưa được làm mượt bằng thuật toán RDP trên chuỗi điểm 2D $P_i = (s_i, z_i)$ với s_i là khoảng cách lũy kế và z_i là cao độ. Qua đó, các điểm đổi dốc chính yếu được nhận diện, làm cơ sở xác định chiều dài đoạn dốc Ld và độ dốc dọc bình quân (%).

3.2.5. Ghép các đường cong cùng chiều và thông số cấu hình theo TCVN 4054:2005

Điểm đo i thuộc phân đoạn cong khi $R_i \leq R_{limit}$. Để loại bỏ lỗi "đường cong gãy khúc" (broken-back curve) theo khuyến cáo của TCVN 4054 [19], khi hai đường cong cùng chiều xen giữa bởi đoạn thẳng ngắn có $L_{insert} \leq 2V_d$, thuật toán tự động sáp nhập chúng thành một đường cong phức hợp duy nhất.

4. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH VÀ XỬ LÝ SỐ LIỆU

Nghiên cứu thử nghiệm trích xuất và xử lý tọa độ không gian 3 chiều (Kinh độ λ, Vĩ độ ϕ, Cao độ z) trên 16 tuyến đường thực tế tại Việt Nam với các đặc trưng đại diện:

- Địa hình đa dạng: Trải dài từ miền núi phía Tây Bắc (QL279, QL4D, QL70), cao nguyên Tây Nguyên (QL19, QL14), dải ven biển miền Trung (QL9, QL1, cao tốc Đà Nẵng - Quảng Ngãi), Đồng bằng Bắc Bộ (QL5, QL10, QL21B, cao tốc Hà Nội - Hải Phòng) đến Đồng bằng sông Cửu Long (QL53, QL62, QL91B).
- Cấp kỹ thuật và dải tốc độ thiết kế rộng: Trải dài từ đường cấp IV - V miền núi ($V_{tk} = 40$ km/h), đường cấp III đồng bằng ($V_{tk} = 60 \div 80$ km/h), đường cấp I - II đồng bằng ($V_{tk} = 100$ km/h) đến các tuyến đường cao tốc loại A ($V_{tk} = 100 \div 120$ km/h).
- Quy mô dữ liệu lớn: Toàn bộ mạng lưới khảo sát có tổng chiều dài 1.084,77 km, được số hóa thành 51.983 điểm đo tọa độ không gian với cự ly lấy mẫu trung bình đồng nhất xấp xỉ 20 m/điểm.

Bảng 1. Bảng tổng hợp kết quả xử lý yếu tố hình học từ 16 tuyến đường

STT	Tuyến đường	Phân cấp kỹ thuật	V_{tk} (km/h)	Số điểm đo	Số đường cong (R ≤ R_{limit})	Số đoạn dốc trắc dọc	Chiều dài (km)	Số đường cong/km (ĐC)
1	QL279 (Điện Biên)	Cấp IV miền núi	40	1,021	79	167	20,39	3,87
2	QL4D (Lai Châu)	Cấp IV - V miền núi	40	3,135	175	422	62,6	2,80
3	QL70 (Phú Thọ - Yên Bái)	Cấp IV - V miền núi	40	810	46	105	16,17	2,84
4	QL19 (Gia Lai)	Cấp III - IV miền núi	60	3,235	84	405	64,6	1,30
5	QL53 (Vĩnh Long - Trà Vinh)	Cấp III đồng bằng	60	1,501	13	100	30,06	0,43
6	QL62 (Long An)	Cấp III đồng bằng	60	3,314	29	258	66,32	0,44
7	QL9 (Quảng Trị)	Cấp III miền núi/ĐB	60	3,08	75	262	61,6	1,22
8	QL91B (Cần Thơ - Sóc Trăng)	Cấp III đồng bằng	60	2,33	15	211	46,66	0,32

STT	Tuyến đường	Phân cấp kỹ thuật	V_{tk} (km/h)	Số điểm đo	Số đường cong (R ≤ R_{limit})	Số đoạn dốc trắc dọc	Chiều dài (km)	Số đường cong/km (ĐC)
9	QL 1 (Quảng Bình - Q.Trị)	Cấp III đồng bằng	80	4,247	91	265	85,03	1,07
10	QL 10 (Hải Phòng - Thái Bình)	Cấp III đồng bằng	80	3,707	65	163	74,25	0,88
11	QL 14 (Đắk Lắk)	Cấp III đồng bằng	80	1,649	28	177	32,95	0,85
12	QL 21B (Hà Nội - Hà Nam)	Cấp III đồng bằng	80	2,969	88	238	59,51	1,48
13	QL 5 (Hưng Yên - Hải Dương)	Cấp I - II đồng bằng	100	3,139	42	144	62,73	0,67
14	CT Vĩnh Hảo - Phan Thiết	Cao tốc phân kỳ	100	5,879	126	331	117,52	1,07
15	CT Đà Nẵng - Quảng Ngãi	Cao tốc Loại A	100	8,092	55	768	162,06	0,34
16	CT Hà Nội – Hải Phòng	Cao tốc Loại A	120	6,499	46	437	129,98	0,35
Σ	**Tổng cộng 16 tuyến**			49,197	1,057	4,453	1.092,43	

Bảng 1 cho thấy quy luật phân hóa hình học tuyến thể hiện rõ nét và tương thích chặt chẽ với điều kiện địa hình:

Tuyến miền núi (QL4D, QL279, QL70, QL19): Mật độ đường cong nằm rất cao, đặc biệt ở vùng núi phía Bắc (QL279 có trung bình 3,87 đường cong/km; QL4D có mật độ đường cong là 2,8 đường cong/km). Phần lớn đường cong có bán kính nhỏ (R<150 m, nhiều vị trí có R < 60 m) kèm góc chuyển hướng lớn $\alpha > 90^0$. Trắc dọc phân cắt rất mạnh với số lượng đoạn dốc lớn (QL4D gồm 422 đoạn/62,6 km; QL19 có 405 đoạn dốc). Độ dốc dọc bình quân nhiều đoạn nằm trong khoảng từ 6% đến 9%.

Nhóm tuyến trong vùng địa hình đồng bằng QL53, QL62, QL91B, QL10, QL21B, QL14: Mật độ đường cong thưa thớt (QL53 có mật độ 0,43 đường cong/km; QL91B có trung bình 0,32 đường cong/km). Các đoạn thẳng chiếm ưu thế với hơn 85% chiều dài tuyến; rắc dọc êm thuận với độ dốc dọc chỉ dao động khoảng 1% - 2%.

Nhóm quốc lộ cấp cao và đường cao tốc (với $V_{tk} = 100 \div 120\ km/h$) như QL 5, cao tốc Vĩnh Hảo - Phan Thiết, cao tốc Đà Nẵng - Quảng Ngãi, cao tốc Hà Nội - Hải Phòng): Bán kính đường cong rất lớn. Các R_{fit} phần lớn nằm trong khoảng 1.500 ÷ 5.000 m, bố trí chuyển tiếp vào và ra hoàn chỉnh với ($L_s = 90$ m ÷ 110 m). Trắc dọc rất phẳng, chiều dài đoạn dốc lớn, khoảng từ 500 m ÷ 1.500 m. Độ dốc dọc duy trì thấp, tối đa không quá 3%.

5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG

5.1. Các kết quả

Các thông số hình học sơ bộ của 16 tuyến được số hóa đồng bộ thành tệp dữ liệu CSV chuẩn hóa đa tầng, gồm các trường thông tin:

- Segment_Index: Số thứ tự phân đoạn liên tục dọc tuyến.

- Segment_Type: Loại phân đoạn hình học ("Thẳng", "Chuyển tiếp vào", "Đường cong tròn", "Chuyển tiếp ra" đối với tuyến có $V_{tk} \geq 60$ km/h; hoặc "Thẳng", "Cong" đối với tuyến $V_{tk} = 40$ km/h).

- Turn_Direction: Hướng chuyển hướng ("Thẳng", "Trái", "Phải").

- Length (m): Chiều dài thực tế phân đoạn; dùng để tính lũy kế lý trình điểm đầu và điểm cuối.

- Curve_Radius (m): Bán kính cong ước lượng thích hợp (R_{fit}); đoạn thẳng lấy giá trị "inf".

- Deflection_Angle (deg): Trị số tuyệt đối tổng ($|\alpha|$) của đoạn cong (tính bằng độ).

- Superelevation_TCVN_4054: Độ dốc siêu cao (i_{sc}) tra cứu theo TCVN 4054:2005 (ví dụ: "2%", "3%", "5%", "7%", "8%" hoặc "-"với đoạn thẳng).

Segment_Index	Segment_Type	Turn_Direction	Length (m)	Curve_Radius (m)	Deflection_Angle (deg)	Superelevation_TCVN_4054
1	Thẳng	Thẳng	539.1	inf		-
2	Cong	Trái	59.9	565.67	12.53	2%
3	Thẳng	Thẳng	539.3	inf		-
4	Cong	Trái	179.4	307.63	27.42	3%
5	Cong	Phải	59.9	210.09	17.96	4%
6	Thẳng	Thẳng	119.9	inf		-
7	Cong	Phải	79.8	107.15	29.87	7%
8	Thẳng	Thẳng	159.8	inf		-
9	Cong	Trái	59.9	154.34	16.01	5%
10	Thẳng	Thẳng	359.4	inf		-
11	Cong	Phải	199.8	285.21	46.93	3%
12	Thẳng	Thẳng	160.4	inf		-
13	Cong	Trái	79.9	111.21	38.31	7%
14	Thẳng	Thẳng	239.8	inf		-
15	Cong	Phải	79.8	136.52	21.63	6%
16	Thẳng	Thẳng	460.3	inf		-
17	Cong	Phải	100.1	161.97	29.75	5%
18	Thẳng	Thẳng	421.4	inf		-
19	Cong	Phải	260.9	494.04	34.95	2%
20	Thẳng	Thẳng	60.2	inf		-
21	Cong	Trái	99.4	52.37	75.84	8%
22	Thẳng	Thẳng	300.1	inf		-
23	Cong	Trái	79.6	63.7	43.34	8%
24	Thẳng	Thẳng	20	inf		-
25	Cong	Phải	179.9	125.39	67.15	6%

Hình 2. Ví dụ kết quả: Đoạn ảnh cắt ra từ tập tin dữ liệu phân đoạn hình học đoạn - QL4D

Dữ liệu vi mô từng điểm đo

Tệp "…_pointwise.csv" bao gồm 51.983 bản ghi dọc tim tuyến (bước lấy mẫu trung bình ~ 20 m/điểm) cấu trúc thành 3 nhóm trường thông số:

- Nhóm tọa độ không gian và cao độ:

+ "Index": Thứ tự điểm đo liên tục (1 đến N).

+ "Lat", "Lng": Tọa độ địa lý (WGS84).

+ "Elevation_m": Cao độ trích xuất từ mô hình DEM (m).

- Thông số hình học bình đồ vi mô và toàn đoạn:

+ "Radius_m": Bán kính cong cục bộ tức thời qua 3 điểm liên tiếp (đoạn thẳng gán "inf" hoặc để trống).

+ "Curve_Radius_m": Bán kính thiết kế tương đương (R_{fit}) của toàn đường cong sau khi khớp đường tròn (gán đồng nhất cho các điểm cùng đoạn cong).

+ "Curvature_1_per_m": Độ cong vi mô tức thời.

+ "Is_Sharp_Turn": Biến logic Boolean ("True"/"False"), cảnh báo đường cong gấp khi bán kính tức thời nhỏ hơn ngưỡng giới hạn.

+ "Deflection_Angle_deg": Góc chuyển hướng tổng hợp ($|\alpha|$)của cụm đường cong.

+ "Turn_Direction": Hướng chuyển hướng ("Thẳng", "Trái", "Phải").

+ "Segment_Type": Phân loại đoạn theo TCVN 4054:2005 ("Thẳng", "Chuyển tiếp vào", "Đường cong tròn", "Chuyển tiếp ra").

- Thông số trắc dọc tức thời và tuyến tính hóa:

+ "Slope_Percent": Độ dốc dọc tức thời giữa 2 điểm kế tiếp (tính theo %).

+ "Slope_Segment_Percent": Độ dốc dọc bình quân (i, %) của phân đoạn sau khi làm mượt bằng thuật toán RDP.

+ "Slope_Segment_Length_m": Chiều dài phân đoạn dốc (L_d, mét).

+ "Slope_Segment_Info": Chuỗi tóm tắt đặc tính đoạn dốc (ví dụ: "i = +1,25%, L = 350,2 m").

+ "Is_Steep_Slope": Biến logic Boolean ("True"/"False"), cảnh báo đoạn dốc nguy hiểm vượt ngưỡng an toàn theo TCVN 4054.

Index	Lat	Lng	Radius_m	Curve_Radius_m	Deflection_Angle_deg	Turn_Direction	Curvature_1_per_m	Is_Sharp_Turn	Elevation_m	Slope_Percent	Slope_Segment_Percent	Slope_Segment_Length_m	Slope_Segment_Info	Is_Steep_Slope
1	22.5433	103.2877	178.4766	inf		Thẳng	0.005603	FALSE	267	0	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
2	22.5433	103.2879	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	267	0	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
3	22.5433	103.2881	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	268	5	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
4	22.5433	103.2883	640.0845	inf		Thẳng	0.001562	FALSE	269	5	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
5	22.54329	103.2885	2138.036	inf		Thẳng	0.000468	FALSE	269	0	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
6	22.54329	103.2887	81848.43	inf		Thẳng	1.22E-05	FALSE	269	0	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
7	22.54328	103.2888	3541.606	inf		Thẳng	0.000282	FALSE	270	5	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
8	22.54327	103.289	1907.217	inf		Thẳng	0.000524	FALSE	271	5	3.13	159.7	i = +3.13%, L = 159.7m	FALSE
9	22.54327	103.2892	1536.317	inf		Thẳng	0.000651	FALSE	272	5	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
10	22.54327	103.2894	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	272	0	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
11	22.54327	103.2896	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	272	0	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
12	22.54326	103.2898	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	271	-5	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
13	22.54326	103.29	617.5378	inf		Thẳng	0.001619	FALSE	270	-5	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
14	22.54326	103.2902	638.7547	inf		Thẳng	0.001566	FALSE	269	-5	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
15	22.54327	103.2904	960.497	inf		Thẳng	0.001041	FALSE	269	0	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
16	22.54328	103.2906	634.3439	inf		Thẳng	0.001576	FALSE	268	-5	-3.13	159.7	i = -3.13%, L = 159.7m	FALSE
17	22.54328	103.2908	1385.948	inf		Thẳng	0.000722	FALSE	267	-5	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
18	22.54328	103.291	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	267	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
19	22.54329	103.2912	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	268	5	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
20	22.54329	103.2914	6811.515	inf		Thẳng	0.000147	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
21	22.54329	103.2916	1723.215	inf		Thẳng	0.00058	FALSE	267	-5	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
22	22.54329	103.2918	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	268	5	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
23	22.54329	103.292	4645.941	inf		Thẳng	0.000215	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
24	22.54329	103.2922	609.8094	inf		Thẳng	0.00164	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
25	22.54328	103.2923	864.3614	inf		Thẳng	0.001157	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
26	22.54328	103.2925	1431.51	inf		Thẳng	0.000699	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
27	22.54328	103.2927	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
28	22.54328	103.2929	153.7264	565.67	12.53	Trái	0.006505	FALSE	268	0	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
29	22.5433	103.2931	569.9153	565.67	12.53	Trái	0.001755	FALSE	269	5	1.54	259.5	i = +1.54%, L = 259.5m	FALSE
30	22.54333	103.2933	381.9695	565.67	12.53	Trái	0.002618	FALSE	271	10	-0.59	339.5	i = -0.59%, L = 339.5m	FALSE
31	22.54337	103.2935	3070.83	inf		Thẳng	0.000326	FALSE	270	-5	-0.59	339.5	i = -0.59%, L = 339.5m	FALSE
32	22.54341	103.2937	2361.364	inf		Thẳng	0.000423	FALSE	270	0	-0.59	339.5	i = -0.59%, L = 339.5m	FALSE
33	22.54345	103.2939	5660.649	inf		Thẳng	0.000177	FALSE	270	0	-0.59	339.5	i = -0.59%, L = 339.5m	FALSE
34	22.54349	103.2941	inf	inf		Thẳng	0	FALSE	270	0	-0.59	339.5	i = -0.59%, L = 339.5m	FALSE

Hình 3. Ví dụ kết quả: Đoạn ảnh cắt ra từ tập tin dữ liệu vi mô từng điểm đo - QL4D

Bản đồ trực quan hóa GIS tương tác (Interactive HTML Map):

Mỗi tuyến được tích hợp bản đồ HTML tương tác qua thư viện Leaflet/Folium. Bình đồ được mã hóa màu theo bán kính cong và độ dốc (đỏ: cong gấp/dốc lớn; xanh: đoạn thẳng/dốc êm), hỗ trợ đối chiếu trực quan vị trí công trình trên nền ảnh vệ tinh độ phân giải cao.

Hình 4. Bản đồ trực quan hóa GIS tương tác - QL4D

5.2. Các điểm hạn chế

Nghiên cứu tự đánh giá một số hạn chế nội tại tập trung ở hai nhóm chính:

5.2.1. Về nguồn số liệu

- *Mặt bằng (x, y):* Dữ liệu OSM tiềm ẩn sai số từ ảnh vệ tinh nền (trực giao hóa, dịch chuyển địa hình), sai số thao tác số hóa thủ công, thiếu thống nhất quy ước tim đường và sai số chuyển đổi hệ quy chiếu.

- *Cao độ (z):* Mô hình DEM mở bị ảnh hưởng bởi bề mặt tự nhiên/thảm thực vật vùng núi, hiệu ứng khuếch đại sai số sườn dốc, độ phân giải pixel lớn hơn mặt cắt ngang đường (lẫn ta-luy) và sai số tuyệt đối theo phương đứng.

- *Công trình nhân tạo:* DEM không nhận diện cầu cạn hay hầm chui (ghi nhận cao độ đáy thung lũng hoặc đỉnh núi, tạo ra dốc ảo).

- *Lan truyền sai số:* Sai số tọa độ thô bị khuếch đại qua các công thức vi phân giải tích.

5.2.2. Về phương pháp xử lý, mô hình toán học và cách hiển thị

- Giả định khớp một cung tròn đơn R_{fit} chưa mô tả triệt để các đường cong phức hợp (chữ C, chữ S) ngắn ở miền núi.

- Bước lấy mẫu 20 m khiến các khúc cua ngắn chỉ chứa 2 - 3 điểm đo, làm giảm độ tin cậy ước tính R_{fit}.

- Tuyến tính hóa trắc dọc có thể làm xê dịch điểm đổi dốc và chưa thể hiện đường cong đứng.

- Dữ liệu chưa liên kết với hệ thống cọc mốc thực địa (điểm TĐ, TC), mới áp dụng cho tuyến đơn luồng và chưa xét nút giao cắt.

5.3. Tiềm năng ứng dụng

Các hạn chế trên không làm giảm giá trị của dữ liệu mở mà định hướng quy trình chuẩn hóa phục vụ ngành Giao thông vận tải. Trong chu trình quản lý đầu tư công (Luật Đầu tư công 39/2019/QH14, Luật Xây dựng sửa đổi 62/2020/QH14, Nghị định 15/2021/NĐ-CP), bước lập Pre-FS đề xuất hướng tuyến và tổng mức đầu tư (TMĐT) nhưng gặp khó khăn vì kinh phí khảo sát chi tiết hạn hẹp, tiến độ gấp và phải so sánh 2 - 3 phương án dài hàng trăm kilomet. Khảo sát thủ công bằng mắt và GPS cầm tay thường mang tính cảm tính, dẫn đến sai số khái toán.

Việc tích hợp phân đoạn hình học tự động từ OSM và DEM tạo đột phá toàn diện cho công tác chuẩn bị dự án (Bảng 2).

Bảng 2. So sánh sơ bộ hiệu quả công tác khảo sát thị sát giữa phương pháp truyền thống và phương pháp số hóa từ bản đồ mở

Tiêu chí	Khảo sát thủ công truyền thống	Khảo sát số hóa (OSM + DEM)
Chi phí dữ liệu và nguồn vốn	Kinh phí chuẩn bị dự án eo hẹp, tốn kém công tác phí hiện trường	Chi phí dữ liệu bằng 0 (khai thác nguồn mở), giảm khoảng 70% chi phí thị sát
Thời gian xử lý	Mất nhiều tuần đo đạc, nhập liệu thủ công; tiến độ lập báo cáo chậm	Tự động xử lý tuyến hàng trăm km trong vài phút; có sẵn bình đồ, trắc dọc trước khi ra hiện trường
Độ bao phủ và liên tục	Dữ liệu gián đoạn; dễ sót đường cong gấp, đường cong gãy khúc, dốc nguy hiểm	Dữ liệu liên tục mỗi 20 m; đánh giá toàn diện R, α, i_d và L_d
Phương thức thị sát	Quan sát cảm tính dọc tuyến; dễ thiên lệch chủ quan	"Thị sát định hướng mục tiêu": Nạp trước tọa độ "điểm nóng" vào thiết bị di động để kiểm tra thực địa
So sánh các phương án	So sánh định tính do thiếu dữ liệu bình đồ, cao độ đồng bộ	So sánh định lượng tức thì: Chiều dài, số lượng cong, bán kính trung bình, i_{max}
Cơ sở khái toán TMĐT	Áp dụng suất vốn đầu tư bình quân (triệu đồng/km) cào bằng; nguy cơ đội vốn cao ở bước FS	Phân tách tỷ lệ bám tuyến cũ/nắn tuyến mới; dự báo sớm cầu cạn, tường chắn dốc; khái toán sát thực tế

6. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu đã xây dựng thành công quy trình tự động hóa trích xuất và khôi phục các yếu tố hình học bình đồ (R, α, L_s) và trắc dọc (i, L_d) từ dữ liệu mở OSM kết hợp DEM theo tiêu chuẩn TCVN 4054:2005. Thực nghiệm trên 16 tuyến quốc lộ, cao tốc đại diện tại Việt Nam (1.084,77 km với 51.983 điểm vi mô) chứng minh tính khả thi, độ tin cậy và tốc độ xử lý vượt trội của phương pháp..

Nhờ tích hợp các thuật toán tối ưu (lọc RDP, khớp đường tròn bình phương tối thiểu, tích phân góc lệch hướng, ghép đường cong liên tiếp), các sai số nội tại của dữ liệu mở đã được kiểm soát hiệu quả. Đây là công cụ chi phí thấp phục vụ đắc lực cho khảo sát thị sát định hướng mục tiêu và lập báo cáo Pre-FS. Trong giai đoạn tới, nhóm nghiên cứu hướng đến mở rộng ứng dụng bộ dữ liệu số hóa này vào công tác kiểm toán an toàn giao thông mạng lưới và phân tích tính nhất quán tốc độ vận hành trên đường bộ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tổng cục Đường bộ Việt Nam. Cơ sở dữ liệu hạ tầng giao thông đường bộ Việt Nam. Bộ Giao thông vận tải, 2023.

[2] UBND tỉnh Sơn La. Báo cáo Quy hoạch tỉnh Sơn La thời kỳ 2021- 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2022.

[3] Goodchild, M. F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography. GeoJournal, 69(4), 211-221, 2007, https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y.

[4] OpenStreetMap Foundation. About OpenStreetMap. Internet: https://www.openstreetmap.org/about.

[5] Kurniawan, A., Haryono, A., & Prasetyo, L. B. Road network extraction using Sentinel-2 imagery and machine learning classification. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 17, 100287, 2020, https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100287.

[6] Zhang, J., Wu, Q., & Wang, R. Road extraction from Sentinel-2 imagery using deep learning techniques. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 103, 102517, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102517.

[7] Lu, X., & Weng, Q. Deep learning-based road extraction from remote sensing imagery: Progress, problems and perspectives. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 228, 122-140, 2025, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.07.013.

[8] Wang, C., Shu, Q., Wang, X., Guo, B., Liu, P., & Li, Q. A random forest classifier based on pixel comparison features for urban LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 148, 66-77, 2019, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.009.

[9] Nguyễn Văn Hùng, Trần Văn Tùng, Lê Thị Hoa. Ứng dụng ảnh UAV và GIS trong cập nhật hệ thống đường giao thông tỉnh Quảng Nam. Tạp chí Khoa học Trái đất, 43(2), tr. 25-35, 2021.

[10] Đào Đình Châm, Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Ngọc Thắng, Ngô Đức Anh. Ứng dụng viễn thám và công nghệ GIS trong xây dựng cơ sở dữ liệu hệ thống giao thông: Nghiên cứu trường hợp tại tỉnh Sơn La, Việt Nam. Tạp chí Khoa học Địa đồ và Viễn thám (GeoCartaGIS), 4/2025, https://doi.org/10.5281/zenodo.15389345.

[11] Phạm Văn Cự, Trịnh Thị Mai, Nguyễn Văn Dũng. Đánh giá tiềm năng cập nhật dữ liệu giao thông khu vực miền núi bằng ảnh vệ tinh. Tạp chí Địa lý và Tài nguyên, 28(1), tr. 19-27, 2018.

[12] Li, Y., Zhao, W., & Wang, T. Challenges of road extraction in mountainous terrain using satellite imagery. Remote Sensing Letters, 10(4), 392-401, 2019, https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1582064.

[13] Nguyễn Thế Duy, Phạm Hoàng Anh, Lê Thị Mai. Ứng dụng GIS trong mô phỏng mật độ giao thông tại khu vực nội đô Hà Nội. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, 35(4), tr. 42-50, 2020.

[14] Kartheeka Kumar, & Srinivasa Kumar, R. Automated identification and extraction of horizontal curve information from GIS road way (OSM) maps. ResearchGate Publication 360948045, 2021.

[15] Bartin, B., Ozbay, K., & Xu, C. Extracting Horizontal Curvature Data from GIS Maps: Clustering Method. Transportation Research Record, 2673(11), 324-334, 2019, https://doi.org/10.1177/0361198119850789.

[16] Wood, J. S., & Zhang, S. Identification and Calculation of Horizontal Curves for Low-Volume Roadways Using Smartphone Sensors. Transportation Research Record, 2672(39), 23-33, 2018, https://doi.org/10.1177/0361198118759005.

[17] Tsai, Y. (J.), & Ai, C. Automated Superelevation Measurement Method Using a Low-Cost Mobile Device: An Efficient, Cost-Effective Approach Toward Intelligent Horizontal Curve Safety Assessment. Transportation Research Record, 2621(1), 66-74, 2017, https://doi.org/10.3141/2621-08.

[18] Package net.sf.geographiclib, Class Geodesic. Internet: https://geographiclib.sourceforge.io/html/java/net/sf/geographiclib/Geodesic.html.

[19] Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 4054:2005 (2005). Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

■Ngày nhận bài: 05/8/2026 ■Ngày sửa bài: 13/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/8/2026

Nghiên cứu thực nghiệm xác định quy luật lan truyền sóng nổ trong môi trường cát

Experimental study to determine the law of explosion wave propagation in sand environments

> PGS.TS NGUYỄN TRÍ TÁ
Học viện Kỹ thuật Quân sự
Email: nguyentrita@gmail.com

TÓM TẮT

Hiện nay, việc sử dụng thuốc nổ nói chung hay loại thuốc nổ Trinitrotoluen (TNT) nói riêng để phá hoại đất đá hay các công trình xây dựng đã và đang được ứng dụng. Tuy nhiên, để tính toán được áp lực sóng nổ trong môi trường cát tự nhiên thường sử dụng các công thức thực nghiệm. Theo các công thức đó phụ thuộc nhiều vào tham số của môi trường cát, để có được hệ số này cần phải tiến hành thí nghiệm nổ. Vì vậy, bài báo này trình bày kết quả thí nghiệm nổ trong môi trường cát ven biển bằng thuốc nổ TNT, nhằm xác định được quy luật lan truyền sóng nổ trong môi trường cát ven biển phục vụ cho việc tính toán tác dụng phá hoại đến các công trình khi đặt trong môi trường cát.

Từ khóa: Nổ; áp lực sóng nổ.

ABSTRACT

Currently, the use of explosives in general, and trinitrotoluene (TNT) in particular, for destroying rocks, soil, or construction structures is widespread. However, calculating the blast wave pressure in natural sand environments often relies on empirical formulas. These formulas depend heavily on the parameters of the sand environment, and obtaining this coefficient requires conducting explosion experiments. Therefore, this paper presents the results of an explosion experiment in coastal sand environments using TNT, aiming to determine the propagation rules of blast waves in coastal sand environments for calculating the destructive effects on structures placed in such environments.

Keywords: Explosion; blast wave pressure.

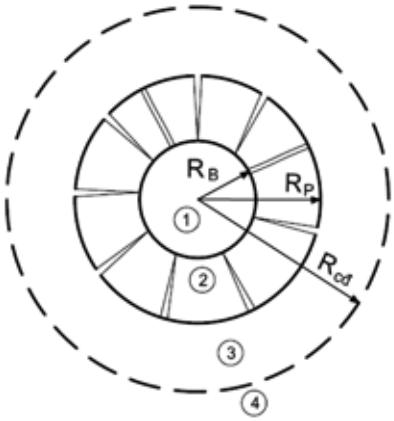
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi nổ trong môi trường đất đá sẽ sinh ra các vùng khác nhau như vùng nén, vùng phá hoại và vùng chấn động. Tại vùng chấn động, đất đá sẽ chịu tác dụng của áp lực sóng nén. Thực tế, bán kính các vùng và áp lực sóng nén trong môi trường đất đá phụ thuộc vào nhiều yếu tố: khối lượng thuốc nổ, các tham số của nền đất, vị trí nổ so với bề mặt đất... Áp lực sóng nổ khi nổ trong môi trường đất đá chưa có các công thức lý thuyết để áp dụng. Đến nay, vẫn chỉ dựa vào các công thức thực nghiệm. Đây là lý do để tác giả triển khai nghiên cứu thực nghiệm nổ trong môi trường cát ven biển nhằm xác định được các tham số và quy luật lan truyền của sóng nổ trong môi trường cát. Trên cơ sở kết quả thí nghiệm nổ trong môi trường cát ven biển bằng các lượng nổ TNT sẽ đưa ra được các hệ số cần thiết phục vụ xây dựng hàm số thực nghiệm thể hiện quy luật lan truyền sóng nổ trong môi trường cát ven biển.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN TÁC DỤNG NỔ TRONG MÔI TRƯỜNG ĐẤT ĐÁ [1]

Khi nổ trong đất, môi trường đất xung quanh lượng nổ hình thành 3 vùng nổ rõ rệt:

- Vùng nén là vùng kề sát khối thuốc nổ. Khi sản phẩm nổ dãn nở đất bị nén rất mạnh tạo thành khối rỗng, đất bị biến dạng dẻo, ép chặt vào nhau hình thành vành đai cứng.
- Vùng phá hoại kề sát vùng nén, đất trong vùng này bị phá hoại dưới dạng các vết nứt xuyên tâm và tiếp tuyến.
- Vùng chấn động kề sát vùng phá hoại, đất ở đây bị biến dạng đàn hồi.



Hình 1. Nổ trong môi trường vô hạn

Cả ba vùng này gọi là vùng biến dạng với bán kính lần lượt R_B, R_P, R_C.

Bằng thực nghiệm Giáo sư M.A.Xa-đốp-sky đã đưa ra các công thức để xác định các vùng tương ứng như sau:

$$R_B = m.K_B.\sqrt[3]{K_T.C}$$
$$R_P = m.K_P.\sqrt[3]{K_T.C} \quad (1)$$
$$R_C = m.K_C.\sqrt[3]{K_T.C}$$

Trong đó:

- m là hệ số lèn;
- K_B, K_P, K_C là các hệ số phụ thuộc tính chất môi trường đối với các vùng nén, vùng phá hoại vỡ vùng chấn động;
- K_T là hệ số sử dụng thuốc;
- C là trọng lượng khối nổ (kg).

Áp lực sóng nén tại một điểm được tính theo công thức [1]:

$$\Delta P = A.\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^m \quad (2)$$

Trong đó:

- ΔP là áp lực sóng nén, kG/cm²;
- R là khoảng cách từ tâm nổ đến điểm tính toán trên kết cấu, m;
- A và m là các hệ số thực nghiệm phụ thuộc loại đất;

Thời gian duy trì tác dụng của sóng nén tính theo công thức thực nghiệm:

$$\tau = 10^{-3}(R + \sqrt[3]{C}) \quad (3)$$

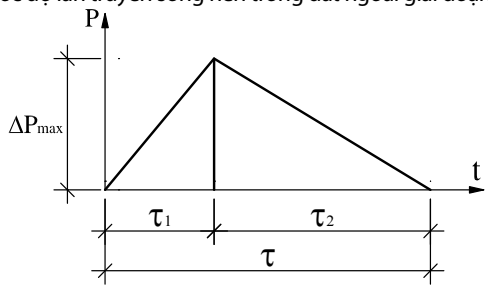
Thời gian áp lực tăng từ 0 đến cực đại xác định theo công thức:

$$\tau_1 = \frac{R - 0,6\sqrt[3]{C}}{a_0}\left(\frac{a_0}{a_1} - 1\right) \quad (4)$$

Thời gian giảm áp lực:

$$\tau_2 = \tau - \tau_1 \quad (5)$$

a_0 là tốc độ lan truyền sóng nén trong đất trong giai đoạn đàn hồi;
a_1 là tốc độ lan truyền sóng nén trong đất ngoài giai đoạn đàn hồi.



Hình 2. Biểu đồ áp lực sóng nén theo thời gian

3. THÍ NGHIỆM NỔ XÁC ĐỊNH ÁP LỰC VÀ QUY LUẬT LAN TRUYỀN SÓNG NỔ TRONG MÔI TRƯỜNG CÁT VEN BIỂN

3.1. Đặc tính cơ lý của môi trường cát ven biển

Hình 3. Dạng địa chất cát ven biển

Số liệu địa chất của môi trường cát ven biển được thí nghiệm trong phòng và có kết quả thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số địa chất của môi trường cát ven bờ biển

TT	Tham số địa chất	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị
1	Mô đun đàn hồi	Mpa	E	3 ÷ 5
2	Khối lượng riêng	g/cm³	Δ	2,66
3	Góc ma sát trong	Độ	φ	24⁰35′ ÷ 46⁰03′
4	Lực dính kết	kG/cm²	C	0
5	Cường độ kháng nén khô	kG/cm²	R_k	---
6	Hệ số nén lún	cm²/kG	a_{1-2}	0,026 ÷ 0,082
7	Độ bão hòa	%	G	11,5 ÷ 60
8	Độ ẩm tự nhiên	%	W	5 ÷ 25
9	Giới hạn chảy	%	W_L	---
10	Giới hạn dẻo	%	W_P	---
11	Chỉ số dẻo	%	I_P	---
12	Khối lượng thể tích	g/cm³	γ	1,3 ÷ 1,57
13	Khối lượng thể tích khô	g/cm³	γc	1,24 ÷ 1,26
14	Độ rỗng	%	n	52,63 ÷ 53,38
15	Hệ số rỗng		e_o	1,11 ÷ 1,15

3.2. Lựa chọn phương pháp, mô hình và thiết bị thí nghiệm

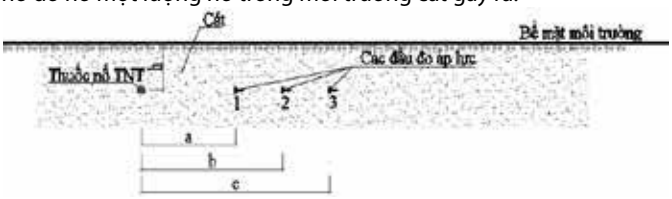
Việc lựa chọn phương pháp, mô hình và thiết bị thí nghiệm để xác định được các tham số và quy luật lan truyền sóng nổ trong các môi trường khác nhau là rất quan trọng. Phương án lựa chọn phương pháp thí nghiệm, mô hình và trang thiết bị thí nghiệm mang tính khả thi khi thực hiện các bài thí nghiệm nổ tại hiện trường.

3.2.1. Lựa chọn phương pháp thí nghiệm

Để xác định được tham số và quy luật lan truyền sóng nổ trong các môi trường cát được thực hiện bằng phương pháp nổ thực nghiệm. Theo đó tác giả sẽ tiến hành một số thí nghiệm nổ với các lượng nổ được đặt dưới một độ sâu nhất định và các đầu đo áp lực đặt ở các vị trí khác nhau, nhằm xác định được áp lực sóng nổ trong môi trường cát cũng như thiết lập được quy luật lan truyền áp lực sóng nổ phục vụ cho việc tính toán tác dụng phá hoại đến công trình khi đặt trong môi trường cát chịu tác dụng của các vụ nổ.

3.2.2. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm được tiến hành theo các bài thí nghiệm nổ trong môi trường cát để đo sóng nén do tác dụng nổ Hình 4. Theo mô hình này, thuốc nổ và các đầu đo đều được chôn trong môi trường cát nhằm đo được áp lực tại các khoảng cách khác nhau so với tâm nổ. Kết quả theo mô hình này sẽ phản ánh thực chất sóng nổ do nổ một lượng nổ trong môi trường cát gây ra.



Hình 4. Mô hình thí nghiệm nổ trong môi trường cát

3.2.3. Lựa chọn trang thiết bị thí nghiệm

3.2.3.1. Máy đo động NI SCXI-1000DC

Máy đo động đa kênh NI SCXI-1000DC là thiết bị đo động đa kênh hiện đại do hãng National Instrument của Mỹ chế tạo. Đây là một hệ thống đo thông minh có cấu hình linh hoạt bằng cách tích hợp các loại card đo khác nhau tùy theo mục đích thí nghiệm của người sử dụng. Máy có nguồn điện một chiều ắc-quy đi kèm có thể thao tác liên tục ngoài hiện trường 10 giờ không cần nạp điện. Tốc

độ đo lấy mẫu của máy có thể đạt tới 9600 mẫu/s với mức nhiễu cực thấp. Trên máy bố trí 4 khe cắm dùng để cắm các loại card đo khác nhau. Hãng NI cung cấp một dải rất rộng rãi các loại card đo thuộc dòng SCXI, phù hợp với dòng máy SCXI-1000DC. Các loại card này có thể đo được rất nhiều các phép đo khác nhau như đo gia tốc, đo biến dạng, chuyển vị, đo điện áp Hình 5.

Hình 5. Máy đo động NI SCXI-1000DC

Máy đo NI SCXI-1000DC được điều khiển hoàn toàn bằng máy tính thông qua kết nối USB. Phần mềm điều khiển LABVIEW là một phần mềm đo - phân tích nổi tiếng trên thế giới. Phần mềm này cho phép thiết kế các chương trình đo và phân tích số liệu trực tiếp trong khi đo hay xử lý nguội sau khi đo với số lượng kênh lên tới hàng ngàn kênh một lần đo.

3.2.3.2. Đầu đo áp lực trong đất KDC-1MPA (hãng TML, Nhật chế tạo)

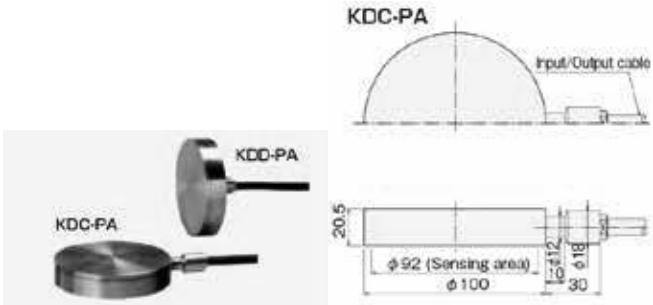
Đầu đo KDC-PA là đầu đo áp lực đất có khả năng chống ăn mòn trong môi trường nước biển. Đầu đo này thường được sử dụng để đo áp lực của sóng nổ trong môi trường đất và áp lực sóng nổ tác dụng lên kết cấu công trình. Áp lực tối đa của đầu đo kiểu KDC-1MPA là 1Mpa (Hình 6).

3.2.3.3. Các trang thiết bị khác phục vụ thí nghiệm

- Máy điểm hỏa
- Máy đo điện trở dùng trong công tác nổ QJ41
- Máy tính
- Máy in ..

3.2.3.1.. Các loại vật liệu nổ

- Thuốc nổ sử dụng loại thuốc nổ TNT do Liên Xô sản xuất
- Kíp nổ điện số 8.



Hình 6. Đầu đo áp lực trong đất KDC

Bảng 2. Các thông số của đầu đo áp lực đất

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Model		KDC-1MPA
2	Serial		
3	Khả năng	MPa	1
4	Đầu ra định mức	mV/V (2000x10^{-6} biến dạng)	≈ 1
5	Độ phi tuyến	%RO	1
6	Khoảng nhiệt độ	°C	-20 ÷ 60

3.3. Kết quả thí nghiệm nổ trong môi trường cát ven biển

3.3.1. Kết quả thí nghiệm đo áp lực

Thực hiện 03 lần nổ với khối lượng thuốc nổ từ 0,05 kg đến 0,1 kg cùng sử dụng 03 đầu đo áp lực. Sơ đồ thí nghiệm như Hình 4. Các tham số khoảng cách và khối lượng thuốc nổ cho mỗi lần nổ thể hiện trong Bảng 3.

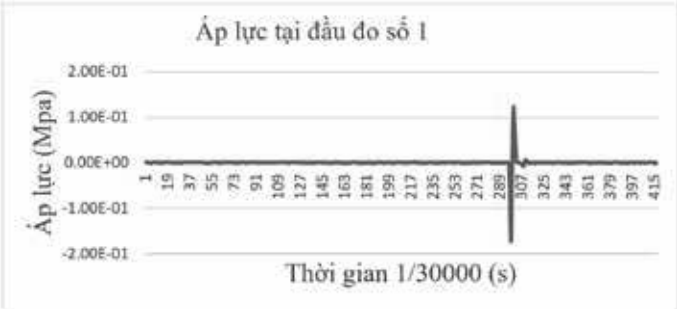
Bảng 3. Tham số, khối lượng thuốc nổ, chiều sâu đặt thuốc và khoảng cách từ tâm nổ đến các đầu đo áp lực

TT	Lần nổ	h (m)	a (m)	b (m)	c (m)	Khối lượng TNT(kg)	Ghi chú
1	Lần thứ 1	0,8	1,5	2,5	3,5	0,05	Nổ trong cát
2	Lần thứ 2	0,8	1,5	2,5	3,5	0,075	Nổ trong cát
3	Lần thứ 3	0,8	1,5	2,5	3,5	0,10	Nổ trong cát

3.3.1.1. Lần nổ thứ nhất với khối lượng thuốc nổ 0,05 kg, sâu 0,8 m

Kết quả đo áp lực tại các vị trí như sau:

- Tại vị trí cách tâm nổ 1,5 m cho kết quả trong Hình 7

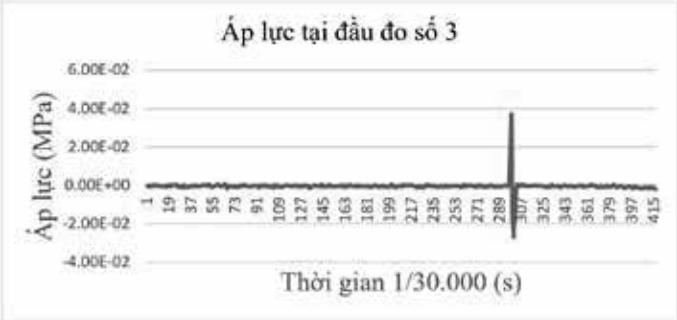


Hình 7. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 1,5 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m cho kết quả trong Hình 8

Hình 8. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m cho kết quả trong Hình 9



Hình 9. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m

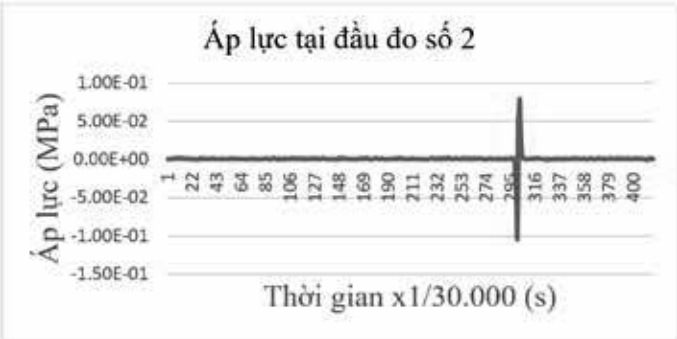
3.3.1.2. Lần nổ thứ hai với khối lượng thuốc nổ 0,075 kg, sâu 0,8 m

Kết quả đo áp lực tại các vị trí như sau:

- Tại vị trí cách tâm nổ 1,5 m cho kết quả trong Hình 10

Hình 10. Biểu đồ áp lực vị trí cách tâm nổ 1,5 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m cho kết quả trong Hình 11



Hình 11. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m cho kết quả trong Hình 12

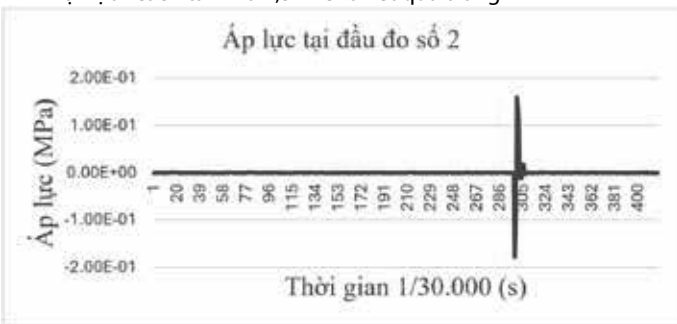
Hình 12. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m

3.3.1.3. Lần nổ thứ ba với khối lượng thuốc nổ 0,10 kg, sâu 0,8 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 1,5 m cho kết quả trong Hình 13

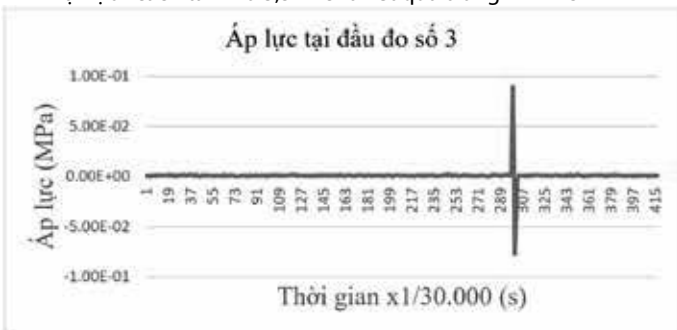
Hình 13. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 1,5 m

- Tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m cho kết quả trong Hình 14



Hình 14. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 2,5 m

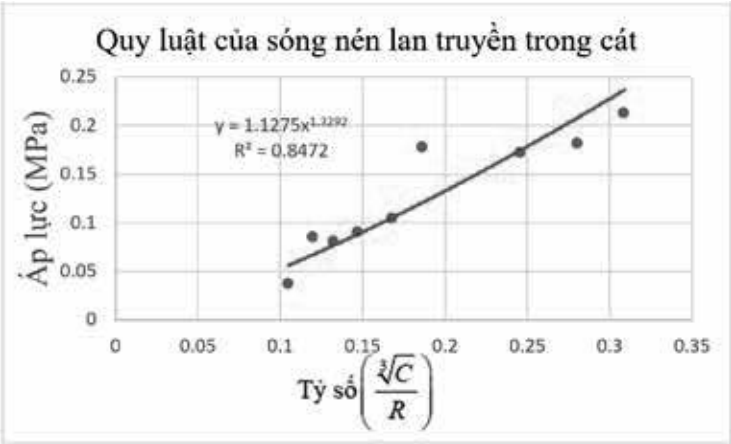
- Tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m cho kết quả trong hình 15



Hình 15. Biểu đồ áp lực tại vị trí cách tâm nổ 3,5 m

3.3.2. Xử lý kết quả xác định quy luật của áp lực sóng nổ

Trên cơ sở kết quả đo các đầu đo áp lực đã được trình bày và phân tích trong mục 3.3.1. Với 03 lần nổ tương ứng với lượng nổ 0,05 kg, 0,075 kg và 0,1 kg nổ trong cát. Từ kết quả các đầu đo áp lực nhận được tín hiệu lớn nhất. Sử dụng thuật toán hồi quy bằng phần mềm excel có kết quả như Hình 16 và trong Bảng 4.



Hình 16. Quy luật áp lực sóng nổ theo thí nghiệm

Bảng 4. Quy luật áp lực sóng nổ trong cát ven biển

Lần nổ	Khối lượng thuốc nổ kg)	Khoảng cách đo R (m)	Tỷ số $\frac{\sqrt[3]{C}}{R}$	Áp lực sóng nén (MPa)	Giá trị hàm áp lực sóng nén tại khoảng cách R (MPa)	Sai số bình phương tối thiểu R^2
1	0,05	1,5	0,246	0.172	$\Delta P = 1,1275.\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^{1,3292}$	$R^2 = 0,8472$
	0,05	2,5	0,147	0.09		
	0,05	3,5	0,105	0.0371		
2	0,075	1,5	0,281	0.182		
	0,075	2,5	0,168	0.105		
	0,075	3,5	0,120	0.085		
3	0,1	1,5	0,309	0.212		
	0,1	2,5	0,186	0.177		
	0,1	3,5	0,132	0.08		

Nhận xét: Từ công thức thực nghiệm $\Delta P = A.\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^m$, thí nghiệm trên nền cát ẩm ven biển cho kết quả ban đầu A= 1,1275 và m= 1,3292, các hệ số này cho thấy đây là đặc trưng nền cát trạng thái ẩm.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở kết quả đo được áp lực bằng các đầu đo áp lực trong môi trường cát ven biển với các lượng nổ khác nhau theo từng lần nổ với các khoảng cách tương ứng. Tác giả đã sử dụng hàm hồi quy bằng phần mềm excel phục vụ việc thiết lập hàm được quy luật lan truyền sóng nổ trong môi trường cát ven dưới dạng công thức thực nghiệm sau:

$$\Delta P = A.\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^m$$

Vì vậy, từ Bảng 4 cho thấy kết quả thực nghiệm đối với nền cát ven biển có hệ số A=1,1275 và hệ số m=1,3292.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Đích. Giáo trình công sự tập I, Học viện Kỹ thuật Quân sự, tr. 93-112, 2008.

[2] Vũ Đình Lợi. Giáo trình Công sự (dùng cho học viên cao học chuyên ngành xây dựng công trình quốc phòng). Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2005.

[3] Hồ Sĩ Giao, Đàm Trọng Thắng, Lê Văn Quyển, Hoàng Tuấn Chung. Nổ Hóa học lý thuyết và thực tiễn. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2010.

[4] Sổ tay sỹ quan công binh. Bộ Tư lệnh Công binh, 1980 và 2005.

[5] Đàm Trọng Thắng, Bùi Xuân Nam, Trần Quang Hiếu. Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình. NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 2015.

[6] Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Hữu Hà, Phan Thành Trung. Giáo trình Công tác nổ mìn. NXB. Quân đội Nhân dân, Hà Nội, 2022.

[7] Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом - Взрывные технологии в промышленности. МГГУ, Москва, 1994, 450 с.

[8] Кутузов Б.Н. Взрывное и Механическое разрушение горных пород. Недра, Москва, 1973, 310с.

[9] Т.М. Саламахин. Пособие для решения по теории механического действия взрыва. ВИА - 1967.

[10] Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике, Изд.ГИТЛ, 1954.

[11] Крюков Г.М. Методы научных исследований. МГГУ. Москва 2002.

■ Ngày nộp bài: 04/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 11/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 01/10/2026

Hoàn thiện cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng (taxi, xe buýt) sang sử dụng điện tại Việt Nam: Thực trạng và giải pháp

Improving mechanisms and policies to encourage the transition of public transport vehicles (taxis and buses) to electric power in Vietnam: Current status and solutions

> **PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI[1], TS THẠCH MINH QUÂN[1,*], THS TRẦN THỊ KIM THANH[2]**
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Học viện Chiến lược, bồi dưỡng cán bộ xây dựng
[*]Email: thachquan@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng từ sử dụng nhiên liệu hóa thạch sang sử dụng điện là giải pháp quan trọng nhằm giảm phát thải khí nhà kính, cải thiện chất lượng môi trường và thực hiện mục tiêu phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050. Những năm gần đây, Việt Nam đã ban hành nhiều chủ trương, chính sách thúc đẩy giao thông xanh, tiêu biểu là Quyết định số 876/QĐ-TTg về lộ trình chuyển đổi năng lượng xanh trong ngành Giao thông vận tải. Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi xe buýt và taxi điện vẫn gặp nhiều khó khăn về thể chế, nguồn lực tài chính, hạ tầng sạc và tổ chức thực hiện.

Bài báo sử dụng phương pháp nghiên cứu tài liệu, phân tích chính sách và tổng hợp kinh nghiệm quốc tế để đánh giá hệ thống cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống chính sách đã bước đầu tạo lập khuôn khổ pháp lý và định hướng phát triển, nhưng còn thiếu tính đồng bộ và các cơ chế hỗ trợ chuyên biệt. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất các nhóm giải pháp hoàn thiện cơ chế, chính sách theo hướng đồng bộ về thể chế, tài chính, hạ tầng, công nghiệp hỗ trợ và chuyển đổi số nhằm thúc đẩy quá trình điện hóa giao thông công cộng theo hướng hiệu quả và bền vững.

Từ khóa: Giao thông xanh; xe buýt điện; taxi điện; chuyển đổi năng lượng; chính sách công.

ABSTRACT

The transition of public transport vehicles from fossil fuels to electric power constitutes a critical solution for reducing greenhouse gas emissions, improving environmental quality and achieving the net-zero emissions target by 2050. In recent years, Vietnam has issued numerous guidelines and policies to promote green transportation, notably Prime Minister's Decision No. 876/QD-TTg on the roadmap for green energy transition in the transport sector. However, the electrification of buses and taxis continues to face substantial challenges related to institutional frameworks, financial resources, charging infrastructure and implementation capacity.

This paper employs document analysis, policy analysis and synthesis of international experience to evaluate the system of mechanisms and policies encouraging the transition of public transport vehicles to electric power in Vietnam. The findings indicate that while the existing policy framework has established an initial legal foundation and development direction, it lacks coherence and specialized support mechanisms. Based on these results, the paper proposes clusters of solutions to improve mechanisms and policies in a coordinated manner across institutional, financial, infrastructural, supporting industry and digital transformation dimensions, thereby promoting an efficient and sustainable electrification of public transport.

Keywords: Green transportation; electric buses; electric taxis; energy transition; public policy.

1. THỰC TRẠNG CƠ CHẾ, CHÍNH SÁCH KHUYẾN KHÍCH CHUYỂN ĐỔI PHƯƠNG TIỆN GIAO THÔNG CÔNG CỘNG SANG SỬ DỤNG ĐIỆN TẠI VIỆT NAM

1.1. Bối cảnh và xu hướng chuyển đổi

Điện hóa phương tiện giao thông công cộng đang trở thành xu hướng phát triển chủ đạo của ngành Giao thông vận tải trên phạm vi toàn cầu. Sự gia tăng áp lực về biến đổi khí hậu, ô nhiễm không khí đô thị và yêu cầu thực hiện các cam kết giảm phát thải khí nhà kính đã thúc đẩy nhiều quốc gia chuyển từ mô hình vận tải dựa trên nhiên liệu hóa thạch sang sử dụng các nguồn năng lượng sạch. Trong bối cảnh đó, xe buýt và taxi được xem là hai nhóm phương tiện ưu tiên do có cường độ khai thác lớn, quãng đường vận hành dài và khả năng mang lại hiệu quả giảm phát thải cao hơn so với phương tiện cá nhân.

Theo xu hướng quốc tế, điện hóa giao thông công cộng không còn được tiếp cận đơn thuần là hoạt động thay thế phương tiện sử dụng động cơ đốt trong bằng phương tiện chạy điện mà đã phát triển thành một hệ sinh thái gồm phương tiện, hạ tầng sạc, nguồn điện, công nghệ pin, hệ thống quản lý vận hành và cơ chế tài chính. Kinh nghiệm của Trung Quốc, châu Âu và nhiều quốc gia đang phát triển cho thấy hiệu quả chuyển đổi phụ thuộc chủ yếu vào mức độ đồng bộ giữa chính sách công, năng lực đầu tư hạ tầng và khả năng huy động nguồn lực của khu vực tư nhân.

Tại Việt Nam, chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện được xác định là một nội dung quan trọng trong Chiến lược tăng trưởng xanh và Chương trình chuyển đổi năng lượng của ngành Giao thông vận tải. Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 của Thủ tướng Chính phủ đã quy định từ năm 2025, toàn bộ xe buýt đầu tư mới phải sử dụng điện hoặc năng lượng xanh; từ năm 2030, xe taxi đầu tư mới phải sử dụng điện hoặc năng lượng xanh. Đây là cơ sở pháp lý quan trọng tạo tiền đề cho việc xây dựng các chính sách hỗ trợ và lộ trình chuyển đổi trên phạm vi toàn quốc.

Trên thực tế, quá trình chuyển đổi bước đầu đạt được những kết quả tích cực tại một số đô thị lớn. Hà Nội và TP.HCM đã triển khai nhiều tuyến xe buýt điện, đồng thời mở rộng nhanh quy mô đội xe taxi điện thông qua sự tham gia của các doanh nghiệp vận tải lớn. Tuy nhiên, kết quả này vẫn mang tính cục bộ, trong khi phần lớn các địa phương khác mới dừng ở giai đoạn chuẩn bị hoặc xây dựng kế hoạch triển khai. Điều này phản ánh sự khác biệt đáng kể về điều kiện kinh tế, khả năng huy động nguồn lực đầu tư, quy hoạch hạ tầng và năng lực tổ chức thực hiện giữa các địa phương.

Nhìn tổng thể, Việt Nam đã chuyển từ giai đoạn định hướng chính sách sang giai đoạn triển khai thực tiễn, song quá trình điện hóa giao thông công cộng vẫn đang ở giai đoạn đầu và cần tiếp tục hoàn thiện cơ chế, chính sách nhằm bảo đảm tính đồng bộ, khả thi và hiệu quả trong tổ chức thực hiện.

1.2. Thực trạng chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam

Việt Nam đang bước vào giai đoạn chuyển đổi từ phương tiện giao thông công cộng sử dụng nhiên liệu hóa thạch sang phương tiện sử dụng điện theo lộ trình được xác định trong Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 của Thủ tướng Chính phủ. So với nhiều quốc gia trong khu vực, quá trình điện hóa phương tiện giao thông công cộng tại Việt Nam diễn ra tương đối muộn nhưng có tốc độ phát triển nhanh trong những năm gần đây, đặc biệt tại các đô thị lớn như Hà Nội, TP.HCM và Đà Nẵng.

Trong các loại hình vận tải hành khách công cộng, xe buýt là lĩnh vực có mức độ chuyển đổi rõ nét nhất. Điều này xuất phát từ đặc điểm khai thác của xe buýt theo tuyến cố định, thời gian hoạt động tương đối ổn định và được quản lý tập trung tại các bến, depot, tạo điều kiện thuận lợi cho việc đầu tư hạ tầng sạc và tổ chức quản lý năng lượng. Đây cũng là lý do nhiều quốc gia lựa chọn xe buýt là phân khúc ưu tiên trong chiến lược điện hóa giao thông công cộng.

Tại Hà Nội, việc đưa vào khai thác thêm nhiều tuyến xe buýt điện đã góp phần nâng tỷ lệ phương tiện sử dụng điện và năng lượng sạch lên khoảng 42,1% tổng số xe buýt toàn mạng lưới vào tháng 4 năm 2026. Trong khi đó, TP.HCM đạt tỷ lệ khoảng 48,7% số xe buýt sử dụng điện và năng lượng sạch, đồng thời tiếp tục mở rộng đầu tư nhằm hoàn thành mục tiêu chuyển đổi toàn bộ đội xe vào năm 2030. Đà Nẵng cũng đã triển khai thay thế các tuyến xe buýt trợ giá bằng xe buýt điện và xây dựng lộ trình chuyển đổi trong giai đoạn tiếp theo. Các kết quả này cho thấy quá trình điện hóa xe buýt tại Việt Nam đã vượt qua giai đoạn thí điểm và đang chuyển sang giai đoạn mở rộng quy mô tại các đô thị trọng điểm.

Đối với taxi, quá trình chuyển đổi diễn ra theo một xu hướng khác. Nếu như xe buýt chủ yếu được thúc đẩy bởi chính sách của Nhà nước thì taxi điện phát triển mạnh dựa trên động lực thị trường và chiến lược đầu tư của doanh nghiệp. Với cường độ khai thác lớn và chi phí nhiên liệu chiếm tỷ trọng đáng kể trong giá thành vận tải, việc sử dụng xe điện giúp doanh nghiệp giảm chi phí vận hành, tăng hiệu quả khai thác và nâng cao khả năng cạnh tranh. Cùng với sự phát triển của các nền tảng gọi xe và mạng lưới trạm sạc, taxi điện đã nhanh chóng mở rộng tại nhiều tỉnh, thành phố trên cả nước.

Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi giữa các địa phương còn có sự khác biệt đáng kể. Những đô thị có quy mô dân số lớn, mật độ phương tiện cao và khả năng huy động nguồn lực đầu tư mạnh thường đạt tốc độ chuyển đổi nhanh hơn. Ngược lại, tại nhiều tỉnh, thành phố khác, việc đầu tư phương tiện điện vẫn còn gặp khó khăn do thị trường vận tải nhỏ, hạ tầng sạc chưa phát triển, khả năng tiếp cận nguồn vốn hạn chế và thiếu các chính sách hỗ trợ đặc thù. Điều này cho thấy mức độ phát triển của thị trường và điều kiện hạ tầng có ảnh hưởng trực tiếp đến tiến trình điện hóa phương tiện giao thông công cộng.

Nhìn chung, Việt Nam đã hình thành xu hướng chuyển đổi rõ rệt đối với cả xe buýt và taxi sử dụng điện. Tuy nhiên, xét trên phạm vi cả nước, quá trình điện hóa vẫn chưa diễn ra đồng đều, chưa tạo được sự lan tỏa rộng giữa các địa phương và còn phụ thuộc nhiều vào năng lực đầu tư của doanh nghiệp cũng như sự chủ động của chính quyền địa phương trong tổ chức thực hiện.

1.3. Đánh giá hệ thống cơ chế, chính sách hiện hành

Trong thời gian qua, Nhà nước đã từng bước hình thành hệ thống chính sách thúc đẩy phát triển phương tiện giao thông sử dụng điện thông qua các nhóm chính sách về định hướng phát triển, ưu đãi thuế, hỗ trợ đầu tư và tổ chức thực hiện. Các văn bản quan trọng như Quyết định số 876/QĐ-TTg, Chỉ thị số 20/CT-TTg, Chỉ thị số 09/CT-TTg cùng các chính sách ưu đãi về thuế tiêu thụ đặc biệt và lệ phí trước bạ đã tạo nền tảng pháp lý ban đầu cho quá trình điện hóa phương tiện giao thông công cộng.

Thực tế cho thấy hệ thống chính sách hiện hành đã xác lập tương đối rõ mục tiêu, lộ trình và định hướng phát triển giao thông công cộng sử dụng điện, chuyển từ cách tiếp cận mang tính khuyến khích riêng lẻ sang quản lý tổng thể gắn với tăng trưởng xanh, giảm phát thải và bảo đảm an ninh năng lượng. Đây là cơ sở để các địa phương xây dựng kế hoạch chuyển đổi phù hợp với điều kiện phát triển kinh tế - xã hội. Tuy nhiên, mức độ triển khai trên thực tế còn không đồng đều, chủ yếu tập trung tại Hà Nội và TP.HCM, trong khi phần lớn các địa phương khác vẫn ở giai đoạn chuẩn bị hoặc chưa xây dựng lộ trình cụ thể.

Bên cạnh những kết quả đạt được, hệ thống chính sách vẫn bộc lộ nhiều hạn chế. Phần lớn các chính sách mới dừng ở định hướng

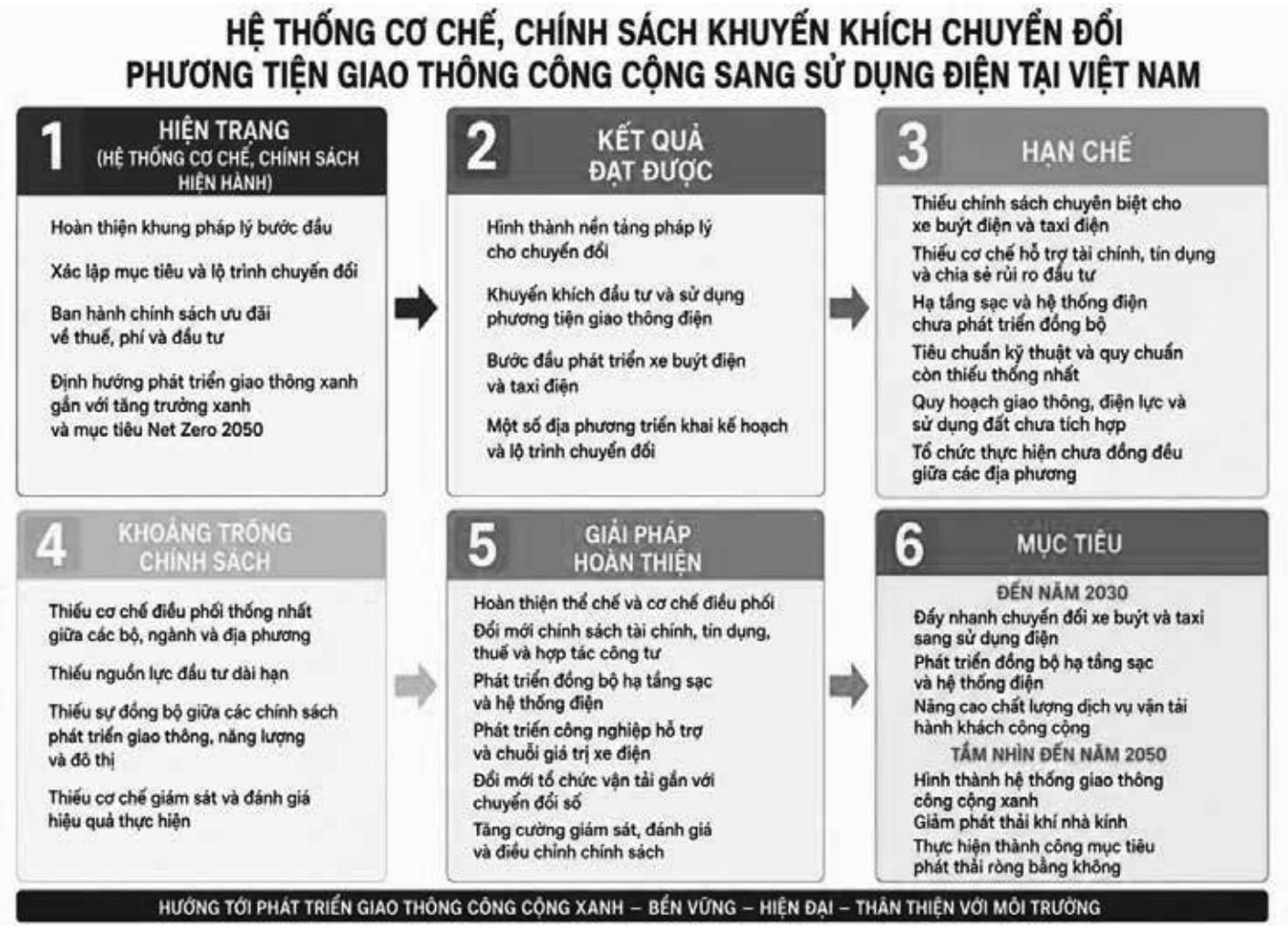
hoặc áp dụng chung đối với ô tô điện, chưa có cơ chế hỗ trợ chuyên biệt cho xe buýt điện và taxi điện. Các chính sách ưu đãi chủ yếu tập trung vào giảm chi phí đầu tư phương tiện nhưng chưa giải quyết hiệu quả các vấn đề then chốt như phát triển hạ tầng sạc, tín dụng xanh, trợ giá vận tải công cộng và chia sẻ rủi ro đầu tư. Điều này khiến nhiều doanh nghiệp vận tải, đặc biệt là doanh nghiệp xe buýt trợ giá và doanh nghiệp quy mô nhỏ còn gặp khó khăn trong quá trình chuyển đổi phương tiện.

Thực trạng cũng cho thấy tính đồng bộ giữa các nhóm chính sách còn hạn chế. Quy hoạch phát triển phương tiện điện chưa được gắn kết chặt chẽ với quy hoạch điện lực, quy hoạch giao thông đô thị, quy hoạch sử dụng đất và phát triển hạ tầng năng lượng. Đồng thời, hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật đối với trạm sạc, pin, tái chế pin và kết nối dữ liệu vẫn đang trong quá trình hoàn thiện, làm gia tăng rủi ro đầu tư và ảnh hưởng đến khả năng mở rộng thị trường.

Một vấn đề đáng chú ý khác là sự khác biệt về năng lực tổ chức thực hiện giữa các địa phương. Trong khi Hà Nội và TP.HCM đã ban hành kế hoạch, bố trí nguồn lực và triển khai một số mô hình xe buýt điện, nhiều địa phương vẫn thiếu chương trình hành động, cơ chế huy động vốn và kế hoạch phát triển hạ tầng sạc. Thực trạng này làm cho tốc độ chuyển đổi diễn ra không đồng đều, hạn chế hiệu quả lan tỏa của chính sách trên phạm vi cả nước.

Từ những phân tích trên có thể nhận thấy, hệ thống cơ chế, chính sách hiện hành đã tạo nền tảng quan trọng cho quá trình điện hóa phương tiện giao thông công cộng, nhưng hiệu quả thực thi vẫn chưa đáp ứng yêu cầu của lộ trình chuyển đổi xanh. Khoảng cách giữa mục tiêu chính sách và kết quả thực hiện chủ yếu xuất phát từ sự thiếu đồng bộ về thể chế, nguồn lực tài chính, hạ tầng kỹ thuật và cơ chế phối hợp. Đây là những vấn đề trọng tâm cần được ưu tiên hoàn thiện trong giai đoạn tới nhằm đẩy nhanh quá trình chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện, hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050.

Kết quả phân tích cho thấy, việc hoàn thiện cơ chế, chính sách cần được tiếp cận theo chuỗi logic từ đánh giá thực trạng đến đề xuất giải pháp và mục tiêu phát triển. Nội dung này được tổng hợp trong Hình 1 thể hiện mối quan hệ logic giữa đánh giá thực trạng và đề xuất giải pháp trong hoàn thiện cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam. Trên cơ sở hệ thống chính sách hiện hành, nghiên cứu chỉ ra các kết quả đạt được, những hạn chế và khoảng trống chính sách, từ đó đề xuất các nhóm giải pháp hoàn thiện nhằm thúc đẩy chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng theo hướng xanh, hiệu quả và bền vững, góp phần thực hiện mục tiêu phát thải ròng bằng không (Net Zero) vào năm 2050.

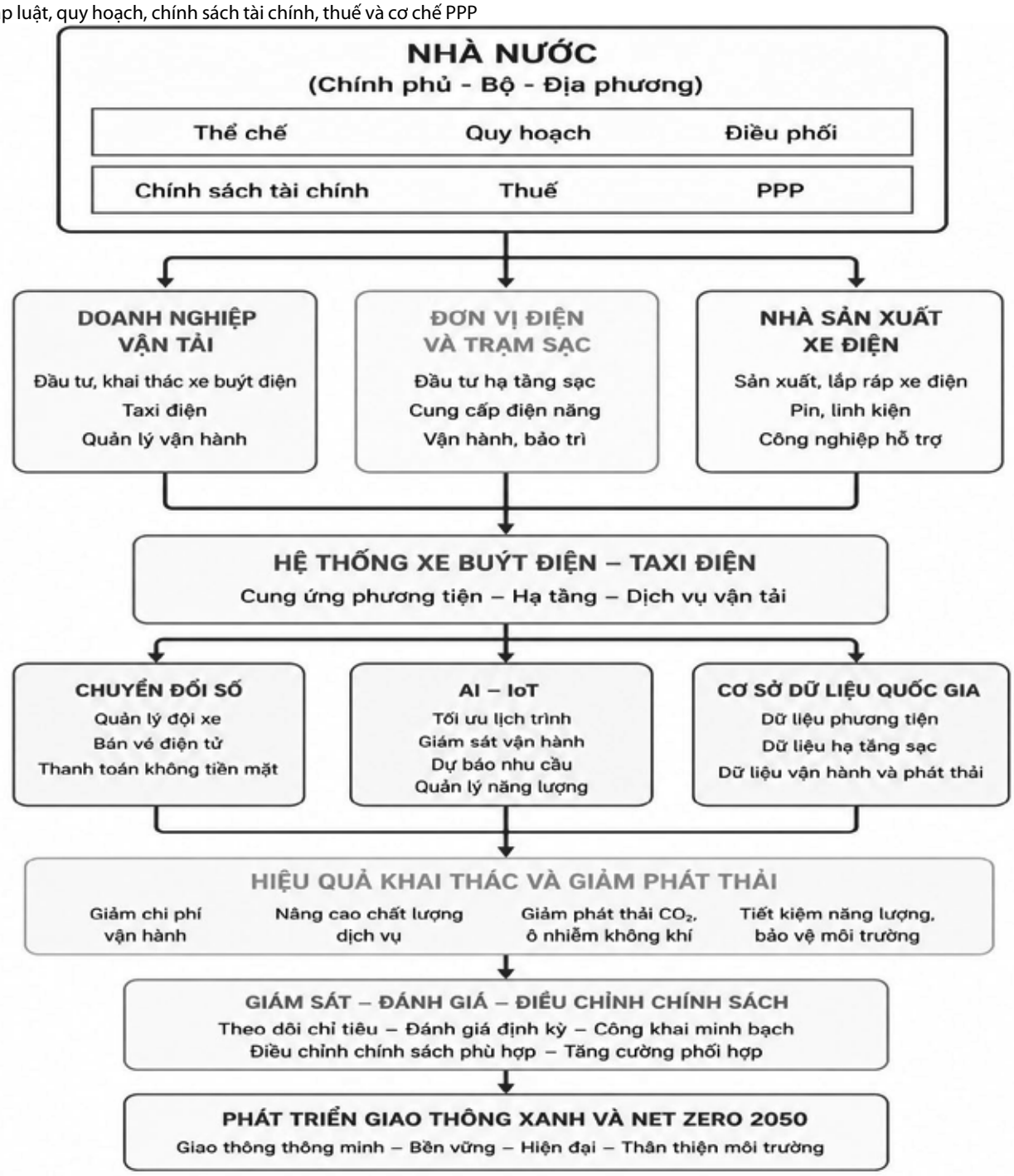


Hình 1. Hệ thống cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

2. GIẢI PHÁP HOÀN THIỆN CƠ CHẾ, CHÍNH SÁCH KHUYẾN KHÍCH CHUYỂN ĐỔI PHƯƠNG TIỆN GIAO THÔNG CÔNG CỘNG SANG SỬ DỤNG ĐIỆN TẠI VIỆT NAM

Kết quả đánh giá thực trạng cho thấy quá trình chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam đã đạt được những kết quả bước đầu nhưng vẫn gặp nhiều rào cản về thể chế, nguồn lực tài chính, hạ tầng kỹ thuật và năng lực tổ chức thực hiện. Vì vậy, việc hoàn thiện cơ chế, chính sách cần được tiếp cận theo hướng xây dựng hệ sinh thái chính sách đồng bộ, trong đó Nhà nước đóng vai trò kiến tạo, điều phối và tạo động lực cho các chủ thể tham gia quá trình chuyển đổi (Hình 2), thông qua hoàn thiện pháp luật, quy hoạch, chính sách tài chính, thuế và cơ chế PPP nhằm tạo môi trường thuận lợi cho quá trình chuyển đổi. Trên cơ sở đó, doanh nghiệp vận tải, đơn vị cung cấp điện và hạ tầng sạc, cùng các nhà sản xuất phương tiện và công nghiệp hỗ trợ phối hợp đầu tư, vận hành hệ thống xe buýt điện và taxi điện. Quá trình chuyển đổi được hỗ trợ bởi chuyển đổi số, ứng dụng AI, IoT, dữ liệu lớn và cơ sở dữ liệu quốc gia nhằm tối ưu hóa vận hành, quản lý năng lượng và nâng cao hiệu quả khai thác. Kết quả cuối cùng là giảm phát thải, nâng cao chất lượng dịch vụ vận tải công cộng và hình thành cơ chế giám sát, đánh giá để tiếp tục hoàn thiện chính sách theo hướng phát triển giao thông xanh và thực hiện mục tiêu phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050.



Hình 2. Mô hình hệ sinh thái chính sách

Thứ nhất, hoàn thiện thể chế và cơ chế điều phối: Cần xây dựng khung pháp lý thống nhất về chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sử dụng điện, quy định rõ lộ trình, trách nhiệm của các bộ, ngành, địa phương và doanh nghiệp; đồng thời bảo đảm sự đồng bộ giữa quy hoạch giao thông, quy hoạch điện, sử dụng đất và phát triển đô thị.

Thứ hai, đổi mới chính sách tài chính và ưu đãi đầu tư: Nhà nước cần triển khai các cơ chế hỗ trợ tín dụng xanh, ưu đãi thuế, kéo dài miễn lệ phí trước bạ đối với taxi điện, hỗ trợ đầu tư xe buýt điện, khuyến khích mô hình PPP trong phát triển hạ tầng sạc và tạo điều kiện huy động các nguồn vốn ODA, vốn vay ưu đãi và nguồn lực xã hội.

Thứ ba, phát triển đồng bộ hạ tầng sạc và công nghiệp hỗ trợ: Cần tích hợp quy hoạch trạm sạc với quy hoạch giao thông và điện lực, ban hành tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất, đồng thời khuyến khích đầu tư sản xuất pin, linh kiện, thiết bị điện và phát triển chuỗi giá trị xe điện theo mô hình kinh tế tuần hoàn.

Thứ tư, đổi mới tổ chức vận tải gắn với chuyển đổi số: Cần điều chỉnh cơ chế trợ giá và đấu thầu đối với xe buýt điện, ưu tiên khai thác taxi điện tại các khu vực trọng điểm, đồng thời ứng dụng AI, IoT, dữ liệu lớn và cơ sở dữ liệu quốc gia nhằm tối ưu hóa quản lý đội xe, lịch sạc và tiêu thụ năng lượng.

Thứ năm, tăng cường giám sát và đánh giá thực hiện chính sách: Cần xây dựng bộ chỉ tiêu đánh giá quá trình chuyển đổi, tăng cường phối hợp giữa Trung ương và địa phương, huy động sự tham gia của doanh nghiệp và cộng đồng, đồng thời thường xuyên rà soát, điều chỉnh chính sách nhằm nâng cao hiệu quả thực thi.

Các nhóm giải pháp trên có mối quan hệ bổ trợ lẫn nhau, hình thành hệ sinh thái chính sách thúc đẩy quá trình điện hóa xe buýt và taxi theo hướng đồng bộ, hiệu quả và bền vững, góp phần thực hiện mục tiêu phát triển giao thông xanh và cam kết phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050.

3. KẾT LUẬN

Chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện là xu hướng tất yếu nhằm hiện thực hóa mục tiêu phát triển giao thông xanh, giảm phát thải khí nhà kính và thực hiện cam kết phát thải ròng bằng "0" của Việt Nam vào năm 2050. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mặc dù Việt Nam đã từng bước hình thành khuôn khổ pháp lý và ban hành nhiều chính sách khuyến khích phát triển phương tiện điện, quá trình chuyển đổi xe buýt và taxi vẫn còn gặp nhiều khó khăn do thiếu tính đồng bộ về thể chế, hạn chế trong cơ chế tài chính, hạ tầng sạc, tiêu chuẩn kỹ thuật và năng lực tổ chức thực hiện.

Trên cơ sở phân tích thực trạng và kinh nghiệm quốc tế, nghiên cứu đề xuất mô hình hệ sinh thái chính sách với 5 nhóm giải pháp trọng tâm, gồm: (i) Hoàn thiện thể chế và cơ chế điều phối; (ii) đổi mới chính sách tài chính và ưu đãi đầu tư; (iii) phát triển đồng bộ hạ tầng sạc và công nghiệp hỗ trợ; (iv) đổi mới tổ chức vận tải gắn với chuyển đổi số; (v) tăng cường giám sát, đánh giá và hoàn thiện chính sách. Các nhóm giải pháp này có mối quan hệ bổ trợ, góp phần huy động sự tham gia của Nhà nước, doanh nghiệp và các bên liên quan, tạo động lực thúc đẩy điện hóa giao thông công cộng theo hướng hiệu quả và bền vững.

Nghiên cứu đóng góp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc hoàn thiện cơ chế, chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện giao thông công cộng sang sử dụng điện tại Việt Nam. Đồng thời, kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng làm tài liệu tham khảo trong quá trình xây dựng, điều chỉnh và triển khai các chính sách phát triển giao thông xanh ở cả cấp quốc gia và địa phương, góp phần thực hiện thành công các mục tiêu về tăng trưởng xanh và phát triển bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 17/11/2022 về tiếp tục đẩy mạnh công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, Hà Nội, 2022. Internet: https://xaydungchinhsach.chinhphu.vn/toan-van-nghi-quyet-29-nq-tw-ve-tiep-tuc-day-manh-cong-nghiep-hoa-hien-dai-hoa-dat-nuoc-den-nam-2030-119221129121112971.htm (truy cập: tháng 9/2026).

[2] Chính phủ. Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 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, Hà Nội, 2022. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=206188 (truy cập: tháng 9/2026).

[3] Chính phủ. Chỉ thị số 20/CT-TTg ngày 12/7/2025 về một số nhiệm vụ cấp bách nhằm giải quyết tình trạng ô nhiễm môi trường, Hà Nội, 2025. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=214542 (truy cập: tháng 9/2026).

[4] Quốc hội. Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 (có hiệu lực thi hành từ ngày 01/01/2022), 2020. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=202613 (truy cập: tháng 9/2026).

[5] International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Trends in Electric Mobility. Paris: IEA, 2025. Internet: https://iea.blob.core.windows.net/assets/0aa4762f-c1cb-4495-987a-25945d6de5e8/GlobalEVOutlook2025.pdf (accessed: 3/2026).

[6] United Nations Environment Programme. Global Electric Mobility Programme: Annual Report 2023. Nairobi: UNEP, 2023. Internet: https://unece.org/sites/default/files/2024-10/6_UNEP_Rev.1.pdf (accessed: 9/2026).

[7] World Bank. The Global Roadmap for Cleaner, More Efficient and Resilient Transport Systems. Washington, DC: World Bank, 2023. Internet: https://www.sum4all.org/global-roadmap-action (accessed: 9/2026).

[8] Asian Development Bank. Electric Mobility and Sustainable Urban Transport in Asia and the Pacific. Manila: ADB, 2024. Internet: https://www.unescap.org/kp/2026/roadmap-advancing-sustainable-public-transport-through-financing-electric-mobility-asia-and (accessed: 9/2026).

■ Ngày nộp bài: 28/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 09/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 29/9/2026

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam

A study on the factors determining the choice of air freight services by import-export enterprises in Vietnam

> THS.NCS NGUYỄN THỊ NHƯ KIM*, TS MAI BÁ LĨNH
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
*Email: nhu.kim0806@gmail.com

TÓM TẮT

Nghiên cứu xác định các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam. Dữ liệu nghiên cứu được thu thập từ khảo sát 420 các chuyên gia và cán bộ đang công tác tại cơ quan quản lý hàng không, doanh nghiệp khai thác cảng và nhà ga hàng hóa hãng hàng không. Kết quả phân tích bằng SPSS 24.0 cho thấy 6 yếu tố đều tác động tích cực đến quyết định lựa chọn dịch vụ, gồm: Nhu cầu thị trường hàng hóa hàng không (β = 0,282); Cơ sở hạ tầng logistics chuyên dụng hàng không (β = 0,258); Hệ sinh thái dịch vụ hàng không (β = 0,225); Nguồn lực và tổ chức vận hành (β = 0,180); Cơ chế và chính sách thương mại (β = 0,148); Vị trí địa lý và khả năng kết nối (β = 0,089). Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho việc xác định khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Từ khóa: Trung tâm logistics chuyên dụng hàng không; logistics hàng không; vận tải hàng hóa hàng không.

ABSTRACT

This study identifies the factors influencing the potential for the establishment of specialized air logistics centers in Vietnam. Research data were collected through a survey of 420 experts and professionals working at aviation regulatory authorities, airport operating enterprises, airline cargo terminal operators and related organizations. The results of the analysis conducted using SPSS 24.0 indicate that all 6 factors have a positive effect on the service selection decision, including: Air Cargo Market Demand (β = 0.282); Specialized Air Logistics Infrastructure (β = 0.258); Aviation Service Ecosystem (β = 0.225); Resources and Operational Organization (β = 0.180); Trade Mechanisms and Policies (β = 0.148) and Geographical Location and Connectivity (β = 0.089). The findings provide an empirical basis for assessing the potential for the establishment of specialized air logistics centers in Vietnam.

Keywords: Specialized air logistics center; air logistics; air cargo transportation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không không chỉ phụ thuộc vào vị trí quy hoạch và quy mô cảng mà còn chịu chi phối bởi nhu cầu thị trường, hạ tầng, mạng vận tải, năng lực dịch vụ và môi trường thể chế. Do có nhiều chủ thể tham gia, chuỗi hàng hóa hàng không chỉ thông suốt khi bảo đảm sự phối hợp đồng bộ, tuân thủ tiêu chuẩn an ninh và số hóa quy trình [1]. Nghiên cứu về cảng và đầu mối hàng hóa hàng không chỉ ra vai trò của nhu cầu, chi phí, doanh nghiệp giao nhận, khai thác ban đêm, chất lượng dịch vụ và thời gian vận chuyển [2, 3]; năng lực đường cất hạ cánh, tính liên tục của dòng hàng, năng lực vận chuyển, cơ sở vật chất và hiệu quả khai thác [4, 5]. Do đó, khả năng hình thành trung tâm phải được đánh giá tổng hợp, không dựa vào một tiêu chí đơn lẻ.

Tại Việt Nam, sản lượng hàng hóa qua các cảng hàng không đạt gần 1,8 triệu tấn năm 2025, trong đó hàng quốc tế chiếm 74,7%; 6 tháng đầu năm 2026 đạt 920,9 nghìn tấn. Tuy nhiên, một số cảng đầu mối vẫn quá tải hạ tầng mặt đất, kết nối đa phương thức thiếu đồng bộ; các hãng nước ngoài nắm hơn 80% thị phần vận chuyển hàng hóa quốc tế, trong khi Việt Nam chưa có hãng hàng không chuyên chở hàng hóa đủ tầm [6]. Quy hoạch hiện hành định hướng bố trí trung tâm logistics hàng không tại các cảng có sản lượng từ 250.000 tấn/năm trở lên và xác định khu vực ưu tiên [7]. Tuy vậy, các tiêu chí trên chưa phản ánh đầy đủ mức độ sẵn sàng hình thành trung tâm. Vì vậy, nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam là cần thiết nhằm xác định các điều kiện tác động và mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố, qua đó cung cấp căn cứ cho việc lựa chọn

địa điểm, xác định thứ tự ưu tiên đầu tư và xây dựng chính sách phát triển phù hợp với thực tiễn.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không

Khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không là mức độ hội tụ điều kiện đầu tư, thiết lập, vận hành, duy trì ổn định. Tổ hợp này gắn với cảng hàng không hoặc vùng phục vụ của cảng, đồng bộ tiếp nhận, gom chia, lưu kho, xử lý, giao nhận, khai báo, kiểm tra chuyên ngành, kết nối vận tải, dịch vụ giá trị gia tăng và trao đổi dữ liệu. Trung tâm không đồng nhất với nhà ga hàng hóa, kho hàng không, trung tâm logistics thông thường, cảng hàng không, đô thị sân bay hoặc đầu mối trung chuyển.

Nhu cầu thị trường hàng hóa hàng không: Yếu tố phản ánh quy mô, cơ cấu, độ ổn định của nguồn hàng sản xuất, xuất nhập khẩu, tiêu dùng; gồm hàng giá trị cao, hàng cần vận chuyển nhanh, hàng lạnh, dễ hư hỏng, chuyển phát nhanh, thương mại điện tử. Chương trình nghiên cứu hợp tác về cảng hàng không (ACRP) phải gắn cơ sở hàng hóa với điều kiện thị trường, kinh tế [8]; Boeing xác định thương mại, ngành hàng, thương mại điện tử định hình nhu cầu hàng hóa hàng không [9], từ đó hình thành giả thuyết nghiên cứu:

H_1: Nhu cầu thị trường hàng hóa hàng không tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Vị trí địa lý và khả năng kết nối: Yếu tố gồm vị trí trong mạng hàng không, tiếp cận thị trường, kết nối đường bay, đường bộ và phương thức vận tải phù hợp, khoảng cách tới nơi sản xuất, tiêu dùng, phạm vi hậu phương hàng hóa. Suwanwong và cộng sự [10] gắn kết nối hàng hóa với cấu trúc mạng [10], trong khi Bombelli và cộng sự [11] nêu vai trò của vùng thu hút hàng, vận tải đường bộ gom trả hàng. Kết nối thuận lợi tập trung dòng hàng, nối trung tâm với mạng vận tải, không đồng nghĩa lựa chọn địa điểm, nên giả thuyết nghiên cứu được đặt ra:

H_2: Vị trí địa lý và khả năng kết nối: Tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Cơ sở hạ tầng logistics chuyên dụng hàng không: Yếu tố phản ánh tính sẵn có, đồng bộ, khả năng mở rộng của nhà ga hàng hóa, khu kho vận, sân đỗ tàu bay chở hàng, kho lạnh, kho hàng nguy hiểm, cơ sở xử lý hàng giá trị cao, thiết bị xếp dỡ, quỹ đất, hạ tầng kỹ thuật. ACRP đề cập công trình, công nghệ, an ninh, khai thác [8]; IATA nhấn mạnh tiếp cận, xử lý hàng đặc thù, dư địa tăng trưởng [12]. Hạ tầng tạo không gian, năng lực kỹ thuật, không thay thế khả năng huy động vốn, vì thế giả thuyết được xác định:

H_3: Cơ sở hạ tầng logistics chuyên dụng hàng không tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Cơ chế và chính sách thương mại: Yếu tố thể hiện sự đồng bộ của quy hoạch, pháp luật, chính sách đầu tư, đất đai; sự thuận lợi của hải quan, kiểm dịch, an ninh, kiểm tra chuyên ngành. WTO yêu cầu xử lý trước khi hàng đến, quản lý rủi ro, phối hợp biên giới [13]; ICAO và WCO nhấn mạnh phối hợp kiểm soát, an ninh, tạo thuận lợi [1]. Quyết định 648/QĐ-TTg, 1485/QĐ-TTg và các điều chỉnh 2025 - 2026 tạo bối cảnh quy hoạch Việt Nam [14-18], [7], không phải bằng chứng nhân quả. Thể chế thuận lợi giảm bất định, thời gian, chi phí tuân thủ, vì vậy giả thuyết được đưa ra:

H_4: Cơ chế và chính sách thương mại tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Hệ sinh thái dịch vụ hàng không: Yếu tố phản ánh sự hiện diện, liên kết của hãng hàng không, doanh nghiệp giao nhận, logistics, phục vụ mặt đất, kho hàng, chủ hàng, nhà tích hợp, hải quan và đơn vị hỗ trợ. ICAO và WCO coi chuỗi hàng hóa là mạng lưới chủ thể phụ thuộc nhau [1]. Bombelli và Fazi cho thấy phối hợp khai thác giảm thời gian chờ [19]; IATA ONE Record chuẩn hóa trao đổi dữ liệu [20]. Liên kết giúp tập hợp dịch vụ, duy trì hoạt động, nhưng khác với năng lực nhà đầu tư hoặc đơn vị vận hành, chính vì thế giả thuyết được đưa ra:

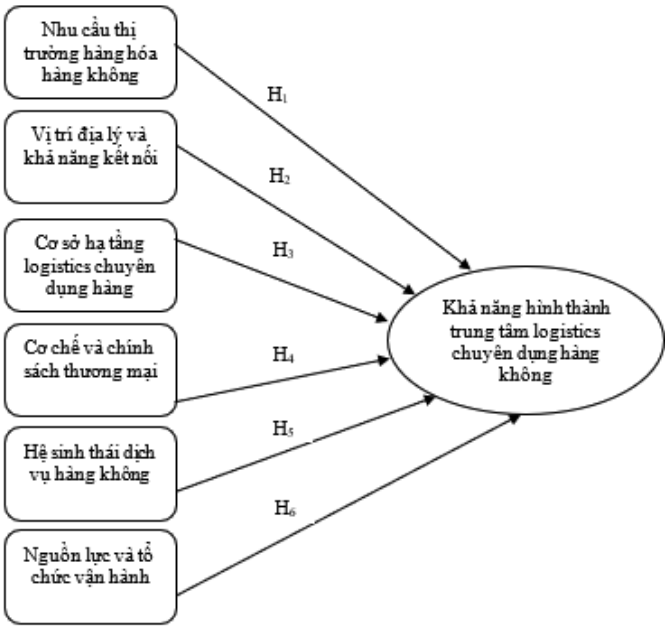
H_5: Hệ sinh thái dịch vụ hàng không tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

Nguồn lực và tổ chức vận hành: Yếu tố gồm huy động vốn, lựa chọn nhà đầu tư, đơn vị vận hành, phát triển nhân lực, ứng dụng công nghệ, nền tảng dữ liệu dùng chung và quy trình chuyên dụng. Hướng dẫn PPP của World Bank, ADB và IDB yêu cầu cấu trúc rõ nguồn lực, quản trị, trách nhiệm vòng đời [21]. ACRP liên kết kế hoạch kinh doanh, công nghệ, vận hành với cơ sở hàng hóa [8]; IATA nhấn mạnh tự động hóa, nhân lực, tích hợp dữ liệu [12, 20]. Năng lực triển khai biến điều kiện thành dự án khả thi, duy trì ổn định, không trùng nội dung hạ tầng, nên giả thuyết được đề xuất:

H_6: Nguồn lực và tổ chức vận hành tác động cùng chiều đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không ở Việt Nam.

2.2. Mô hình nghiên cứu yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không

Dựa trên nền tảng lý thuyết và các nghiên cứu thực nghiệm trước đây về trung tâm logistics chuyên dụng hàng không, đồng thời kết hợp kết quả phỏng vấn sâu 15 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. Yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Nghiên cứu khảo sát 420 chuyên gia và cán bộ đang công tác tại cơ quan quản lý hàng không, doanh nghiệp khai thác cảng và nhà ga hàng hóa, hãng hàng không, doanh nghiệp logistics-giao nhận, doanh nghiệp xuất nhập khẩu và đơn vị đầu tư hạ tầng logistics tại Việt Nam, có kinh nghiệm hoặc trực tiếp tham gia hoạt động vận tải

hàng hóa hàng không và logistics hàng không. 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

Thang đo trong nghiên cứu được kế thừa từ nhiều công trình nghiên cứu trước nên việc kiểm định độ tin cậy của thang đo là cần thiết. Theo Hair và các cộng sự [22] hệ số Cronbach's Alpha phải lớn hơn 0,6 và hệ số tương quan biến - tổng lớn hơn 0,3.

Bảng 1. Tóm tắt kết quả kiểm định độ tin cậy Cronbach's Alpha

STT	Ký hiệu	Thành phần	Số biến	Cronbach's Alpha	Hệ số tương quan biến-tổng hiệu chỉnh thấp nhất
1	NC	Nhu cầu thị trường hàng hóa hàng không	5	0,798	0,570
2	VT	Vị trí địa lý và khả năng kết nối	4	0,813	0,600
3	CS	Cơ sở hạ tầng logistics chuyên dụng hàng không	6	0,834	0,603
4	CC	Cơ chế và chính sách thương mại	5	0,742	0,511
5	HS	Hệ sinh thái dịch vụ hàng không	6	0,797	0,565
6	NL	Nguồn lực và tổ chức vận hành	5	0,827	0,622
7	KN	Khả năng hình thành trung tâm logistics chuyên dụng hàng không	4	0,843	0,631

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả.

Kết quả cho thấy Alpha nằm trong khoảng 0,742 - 0,843; hệ số tương quan biến-tổng hiệu chỉnh thấp nhất của các thang đo đạt 0,511 - 0,631. Thang đo CC có Alpha thấp nhất nhưng vẫn vượt ngưỡng; KN đạt Alpha cao nhất. Không biến nào bị loại vì mọi hệ số tương quan biến-tổng đều đạt yêu cầu, toàn bộ biến được chuyển sang EFA.

3.2. Phân tích nhân tố khám phá EFA

EFA được thực hiện riêng cho 31 biến độc lập bằng Principal Axis Factoring và phép quay xiên Promax vì các cấu trúc có thể tương quan. KMO đạt 0,809; Bartlett $\chi^2(276) = 2.609,388$, $p < 0,001$. Phương pháp trích Principal Component Analysis kết hợp phép quay Varimax đã rút trích được 6 nhân tố có Eigenvalue nhỏ nhất bằng 1,663 (> 1), với tổng phương sai trích đạt 74,628%, tải chính đạt 0,524 - 0,751 và chênh lệch tải chéo nhỏ nhất là 0,436. Kết quả này khẳng định cấu trúc 6 nhân tố độc lập được giữ nguyên theo mô hình nghiên cứu đề xuất.

Đối với 4 biến của thang đo KN, kết quả KMO = 0,816; Bartlett $\chi^2(6) = 506,209$, $p < 0,001$; eigenvalue = 2,309 và phương sai trích = 57,727%. Tải nhân tố dao động 0,696 - 0,830, khẳng định 4 biến quan sát hội tụ tốt vào một nhân tố duy nhất và đáp ứng yêu cầu về giá trị hội tụ.

Bảng 2. Kết quả phân tích nhân tố khám phá EFA các biến độc lập

Mã biến	NC	VT	CS	CC	HS	NL
NC1	0,707					
NC2	0,633					
NC3	0,728					
NC4	0,624					
NC5	0,618					
VT1		0,685				
VT2		0,681				
VT3		0,607				
VT4		0,643				
CS1			0,726			
CS2			0,665			
CS3			0,598			
CS4			0,742			
CS5			0,674			

CS6			0,669			
CC1				0,635		
CC2				0,638		
CC3				0,574		
CC4				0,524		
CC5				0,516		
HS1					0,697	
HS2					0,591	
HS3					0,710	
HS4					0,599	
HS5					0,670	
HS6					0,639	

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả.

3.3. Phân tích tương quan và phân tích hồi quy

Tương quan Pearson giữa KN với 6 biến độc lập đạt 0,307 - 0,421 và đều có p < 0,001; tương quan lớn nhất giữa hai biến độc lập là 0,266. Sáu biến được đưa đồng thời vào hồi quy Enter theo mô hình lý thuyết. Kiểm định RESET (p = 0,699), Breusch-Pagan (p = 0,468) và Jarque-Bera (p = 0,596) không chỉ ra vi phạm đáng kể về dạng tuyến tính, phương sai hoặc phân phối phần dư. Kết quả hồi quy được trình bày tại Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính bội

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	-0,6264	0,2350		–2,665	0,008		
NC	0,2896	0,0444	0,282	6,527	< 0,001	0,9361	1,068
VT	0,0907	0,0459	0,089	1,978	0,049	0,8651	1,156
CS	0,2573	0,0444	0,258	5,796	< 0,001	0,8796	1,137
CC	0,1597	0,0476	0,148	3,358	0,001	0,8959	1,116
HS	0,2339	0,0461	0,225	5,068	< 0,001	0,8892	1,125
NL	0,1842	0,0454	0,180	4,055	< 0,001	0,8854	1,129
Biến phụ thuộc: KN							
R^2 hiệu chỉnh: 0,443							
Thống kê F (ANOVA): 43,227							
Mức ý nghĩa Sig. (ANOVA): 0,000							
Durbin-Watson: 2,026							

Nguồn: Kết quả phân tích dữ liệu của tác giả.

Mô hình đạt F (6,313) = 43,227, p < 0,001 và R^2 hiệu chỉnh = 0,443, hệ số Durbin-Watson bằng 2,026; Tolerance đạt 0,865 - 0,936 và VIF đạt 1,068 - 1,156, phù hợp với tính độc lập của sai số và không cho thấy đa cộng tuyến đáng kể [22]. Theo Beta, mức liên hệ giảm dần là NC, CS, HS, NL, CC và VT. Các hệ số đều dương, với p từ dưới 0,001 đến 0,049; do đó H1-H6 được chấp nhận trong bộ dữ liệu mô phỏng, không phải kết luận thực nghiệm cho Việt Nam. Phương trình chuẩn hóa là:

KN = 0,282NC + 0,089VT + 0,258CS + 0,148CC + 0,225HS + 0,180NL

4. CÁC HÀM Ý QUẢN TRỊ ĐỀ XUẤT

Nhà nước, nhà đầu tư cần khảo sát, dự báo quy mô, cơ cấu, độ ổn định, triển vọng nguồn hàng, chú trọng hàng giá trị cao, giao nhanh, dược phẩm, hàng lạnh, linh kiện điện tử, thương mại điện tử. Quy mô phải bám nhu cầu thực tế; hạ tầng cần đồng bộ nhà ga, kho chuyên dụng, kho lạnh, khu xử lý hàng đặc biệt, thiết bị xếp dỡ, nền tảng dữ liệu. Vị trí phải liên kết cảng hàng không tiềm năng với vùng sản xuất, khu công nghiệp, thị trường, mạng giao thông, khu bay-hải quan-kho bãi.

Cần tăng cường đầu tư và phát triển các dịch vụ tích hợp, chia sẻ dữ liệu, thống nhất quy trình. Nhà đầu tư, đơn vị vận hành cần chọn mô hình đầu tư, quản trị, huy động vốn, nhân lực, công nghệ, phân định trách nhiệm theo giai đoạn. Cần thống nhất quy hoạch hàng không, logistics, giao thông, đất đai; cải thiện thủ tục hải quan, kiểm tra chuyên ngành, dữ liệu điện tử, môi trường đầu tư. Vì Mục 3 dùng dữ liệu mô phỏng, các hàm ý cần kiểm định bằng khảo sát thực tế trước khi sử dụng làm căn cứ hoạch định chính sách hoặc quyết định đầu tư.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] International Civil Aviation Organization and World Customs Organization. Moving Air Cargo Globally: Air Cargo and Mail Secure Supply Chain and Facilitation Guidelines, 3rd ed. Montreal, QC, Canada and Brussels, Belgium: ICAO and WCO, 2023.

[2] J. Gardiner, S. Ison and I. Humphreys. Factors influencing cargo airlines' choice of airport: An international survey. Journal of Air Transport Management, vol. 11, no. 6, pp. 393-399, 2005, doi: 10.1016/j.jairtraman.2005.05.004.

[3] H. Ohashi, T.-S. Kim, T. H. Oum and C. Yu. Choice of air cargo transshipment airport: An application to air cargo traffic to/from Northeast Asia. Journal of Air Transport Management, vol. 11, no. 3, pp. 149-159, 2005, doi: 10.1016/j.jairtraman.2004.08.004.

[4] H. Oktal and A. Özger. Hub location in air cargo transportation: A case study. Journal of Air Transport Management, vol. 27, pp. 1-4, 2013, doi: 10.1016/j.jairtraman.2012.10.009.

[5] C. C. Chao and P. C. Yu. Quantitative evaluation model of air cargo competitiveness and comparative analysis of major Asia-Pacific airports. Transport Policy, vol. 30, pp. 318-326, 2013, doi: 10.1016/j.tranpol.2013.10.001.

[6] Cục Hàng không Việt Nam. Thị trường logistics hàng không Việt Nam, 30/7/2026.

[7] Bộ Xây dựng. Phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch hệ thống cảng hàng không toàn quốc thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Quyết định số 1140/QĐ-BXD, Hà Nội, Việt Nam, 01/7/2026.

[8] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Guidebook for Air Cargo Facility Planning and Development, ACRP Report 143. Washington, DC, USA: The National Academies Press, 2015, doi: 10.17226/21906.

[9] Boeing. World Air Cargo Forecast 2024 - 2043. Seattle, WA, USA: Boeing Commercial Airplanes, 2024.

[10] T. Suwanwong, A. Sopadang, S. Hanaoka and 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.

[11] A. Bombelli, B. F. Santos and L. Tavasszy. Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 138, Art. no. 101959, 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.101959.

[12] International Air Transport Association. 2025 Vision for the Future of Air Cargo Facilities: Reimagining Logistics Through Technology and Innovation. Montreal, QC, Canada: IATA, 2025.

[13] World Trade Organization. Agreement on Trade Facilitation. Geneva, Switzerland: WTO, 2017.

[14] Thủ tướng Chính phủ. 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. Quyết định số 648/QĐ-TTg, Hà Nội, Việt Nam, 07/6/2023.

[15] Thủ tướng Chính phủ. Sửa đổi Phụ lục I và Phụ lục II ban hành kèm theo 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. Quyết định số 1485/QĐ-TTg, Hà Nội, Việt Nam, 24/11/2023.

[16] Bộ Xây dựng. Phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng hàng không, sân bay toàn quốc thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Quyết định số 1102/QĐ-BXD, Hà Nội, Việt Nam, 20/7/2025.

[17] Bộ Xây dựng. Phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng hàng không, sân bay toàn quốc thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Quyết định số 1714/QĐ-BXD, Hà Nội, Việt Nam, 07/10/2025.

[18] Bộ Xây dựng. Phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch hệ thống cảng hàng không toàn quốc thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Quyết định số 657/QĐ-BXD, Hà Nội, Việt Nam, 06/5/2026.

[19] A. Bombelli and 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, Art. no. 102603, 2022.

[20] International Air Transport Association. ONE Record Fact Sheet. Montreal, QC, Canada: IATA, Jun. 2026.

[21] World Bank Group. Asian Development Bank and Inter-American Development Bank. Public-Private Partnerships Reference Guide, ver. 3. Washington, DC, USA: World Bank, 2017.

[22] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin and R. E. Anderson. Multivariate Data Analysis, 8th ed. Cengage, 2019.

■ Ngày nộp bài: 24/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 31/8/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 21/9/2026

Ứng dụng mô hình chuỗi Markov trong phân tích động thái dịch chuyển thị phần giữa các bến cảng container tại Cảng Hải Phòng

Application of Markov chain approach to analyze market share dynamics among container terminals in Haiphong Port

> **THS LÊ HỒNG QUÂN[1], PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG[2,*]**
[1]Công ty Cổ phần Cảng Hải Phòng
[2]Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[*]Email: xuongdc@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích động thái dịch chuyển thị phần giữa các bến cảng container tại Hải Phòng trong giai đoạn 2008 - 2025 bằng mô hình chuỗi Markov áp dụng cho dữ liệu bảng không cân bằng, phản ánh thực tế các bến cảng gia nhập và rút lui khỏi thị trường vào những thời điểm khác nhau. Thị phần hằng năm của từng bến cảng được rời rạc hóa thành 4 trạng thái theo tứ phân vị, từ đó xây dựng ma trận xác suất chuyển đổi trạng thái, tính chỉ số linh động Shorrocks và phân phối trạng thái ổn định dài hạn. Kết quả cho thấy chỉ số tập trung thị trường giảm liên tục trong giai đoạn 2018 - 2025, phản ánh quá trình phi tập trung hóa thị trường ở cụm cảng phía Bắc Việt Nam. Đáng chú ý, chỉ số linh động Shorrocks giảm cho thấy thị trường ổn định hóa nhanh hơn sau khi các bến cảng nước sâu quy mô lớn đi vào hoạt động từ năm 2018, thay vì trở nên xáo trộn hơn. Kết quả nghiên cứu đóng góp cho các cơ quan quản lý nhà nước, các doanh nghiệp khai thác cảng về bức tranh thị trường cạnh tranh giữa các bến cảng container tại Hải Phòng.

Từ khóa: Bến cảng container, Cảng Hải Phòng, thị phần, chuỗi Markov.

ABSTRACT

This study analyzes the dynamics of market share shifts among container terminals in Hai Phong during the period 2008 - 2025 using a Markov chain model applied to unbalanced panel data, reflecting the reality that terminals enter and exit the market at different points in time. The annual market share of each terminal is discretized into four states based on quartiles, from which a state transition probability matrix, the Shorrocks mobility index, and the long-run steady-state distribution are derived. The results indicate that the market concentration index declined continuously during 2018 - 2025, reflecting a process of market deconcentration in the Northern Vietnam port cluster. Notably, the decline in the Shorrocks mobility index indicates that the market became more stable following the commencement of operations of large-scale deep-water container terminals from 2018 onward, rather than becoming more turbulent. These findings provide valuable insights for government authorities and port operators into the competitive dynamics among container terminals in Hai Phong.

Keywords: Container terminals, Haiphong Port, market share, Markov chain.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hải Phòng là cụm cảng container lớn nhất miền Bắc Việt Nam, đóng vai trò cửa ngõ hàng hải cho vùng kinh tế trọng điểm Đồng bằng sông Hồng và cả nước. Trong giai đoạn 2008 - 2025, tổng sản lượng container thông qua khu vực này đã tăng gần 6 lần, đi kèm với đó là làn sóng đầu tư mở rộng hạ tầng: Số bến cảng container hoạt động đồng thời tăng lên gấp gần 4 lần trong giai đoạn 2018 - 2025. Sự gia tăng nhanh chóng về số lượng bến cảng đặt ra câu hỏi thực tiễn quan trọng: Cơ cấu cạnh tranh giữa các bến cảng đã thay đổi như thế nào theo thời gian và liệu quá trình bổ sung năng lực có dẫn đến nguy cơ dư thừa công suất, cạnh tranh quá mức về giá, hay ngược lại, tạo ra một cấu trúc thị trường phân tầng ổn định.

Các nghiên cứu về cảng biển Việt Nam hiện có chủ yếu tập trung vào đo lường hiệu quả kỹ thuật bằng phương pháp bao dữ liệu (DEA) (Nguyen et al., 2021; Le & Nguyen, 2020; Wang et al., 2022) hoặc phân tích biên ngẫu nhiên (SFA) (Bui, 2025), trong khi các nghiên cứu về cơ cấu và mức độ tập trung thị trường còn khá hạn chế. Nghiên cứu gần nhất và có liên quan trực tiếp nhất là của Pham

và cộng sự (2016), sử dụng chỉ số HHI, tỷ lệ tập trung (CR), hệ số Gini và phân tích shift-share để khảo sát xu hướng (phi) tập trung của các bến container tại miền Bắc Việt Nam giai đoạn 2005 - 2014. Nghiên cứu này ghi nhận xu hướng phi tập trung hóa và sự dịch chuyển đáng kể thị phần giữa các terminal trong giai đoạn khảo sát, nhưng dừng lại ở năm 2014 trước khi làn sóng đầu tư cảng nước sâu 2018 diễn ra và chưa lượng hóa được xác suất một bến cảng duy trì hay thay đổi vị thế cạnh tranh qua từng năm.

Ở phạm vi quốc tế, Nguyen và cộng sự (2020) đã kết hợp HHI, hệ số Gini và mô hình super-efficiency để phân tích mối quan hệ giữa mức độ tập trung thị trường và hiệu quả khai thác của 10 cảng container hàng đầu Đông Nam Á giai đoạn 2007 - 2017, trong khi Le và Ieda (2010) đề xuất một chỉ số HHI hiệu chỉnh nhằm khắc phục hạn chế của HHI truyền thống khi áp dụng cho hệ thống cảng biển ở cấp độ quốc gia. Các công cụ này cung cấp một bức tranh tĩnh về mức độ tập trung tại mỗi thời điểm nhưng không mô tả được động thái chuyển đổi - tức xác suất một terminal cụ thể sẽ duy trì, thăng hạng hay tụt hạng trong nhóm thị phần của mình.

Về mặt phương pháp luận, nghiên cứu áp dụng mô hình chuỗi Markov cho dữ liệu bảng không cân bằng trong bối cảnh một hệ thống cảng biển cụ thể. Về mặt thực tiễn, kết quả nghiên cứu đóng góp cho các cơ quan quản lý nhà nước, các doanh nghiệp khai thác cảng về bức tranh thị trường cạnh tranh giữa các bến cảng container tại Hải Phòng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong lý thuyết xác suất và thống kê, chuỗi Markov là một quá trình ngẫu nhiên mô tả một chuỗi các sự kiện có thể xảy ra, trong đó xác suất xảy ra của mỗi sự kiện chỉ phụ thuộc vào trạng thái đạt được ở sự kiện trước đó. Mô hình này được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về thị trường và dự báo thị phần. Các ứng dụng chuỗi Markov trong kinh tế học (Chiba et al., 2017) đã chứng minh tính hữu ích của công cụ này trong việc lượng hóa xác suất chuyển đổi trạng thái nhưng chưa được vận dụng cho bối cảnh cảng biển. Nghiên cứu này kết nối hai nhánh tài liệu trên bằng cách áp dụng mô hình chuỗi Markov kết hợp với chỉ số HHI làm công cụ bổ trợ mang tính mô tả cho dữ liệu panel không cân bằng của các bến cảng container Hải Phòng giai đoạn 2008 - 2025.

Dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu là sản lượng thông qua (TEU) theo năm của các bến cảng container tại Hải Phòng, giai đoạn 2008 - 2025 (18 năm quan sát), tổng cộng 224 quan sát trên tổng số 342 ô dữ liệu tiềm năng. Đây là một bảng dữ liệu không cân bằng điển hình: Các bến cảng gia nhập thị trường hoặc dừng hoạt động vào những thời điểm khác nhau, phản ánh đúng quá trình mở rộng hạ tầng thực tế của cụm cảng. Thị phần của mỗi bến cảng trong mỗi năm được tính trên tổng sản lượng của các bến cảng đang hoạt động trong năm đó, nhằm phản ánh đúng cấu trúc cạnh tranh thực tế tại từng thời điểm:

$$s_{i,t} = \frac{TEU_{i,t}}{\sum_{j \in A_t} TEU_{j,t}} \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó: At là tập hợp các bến cảng container đang hoạt động ở năm t.

Thị phần của toàn bộ 224 quan sát được chia thành 4 trạng thái theo tứ phân vị (quartile), đảm bảo mỗi nhóm có số quan sát tương đối cân bằng:

Bảng 1. Trạng thái tứ phân vị theo thị phần

Trạng thái	Ký hiệu	Ngưỡng thị phần
Nhỏ	S1	≤ 3,33%
Nhỏ vừa	S2	3,33% - 6,48%
Lớn vừa	S3	6,48% - 11,35%
Dẫn đầu	S4	> 11,35%

Đối với dữ liệu không cân bằng, ma trận chuyển đổi được xây dựng chỉ trên các cặp năm liên tiếp (t, t+1) mà bến cảng xuất hiện ở cả hai năm - cách tiếp cận phổ biến khi ứng dụng mô hình Markov cho dữ liệu doanh nghiệp có gia nhập/rút lui. Với 205 cặp chuyển đổi hợp lệ thu được, xác suất chuyển đổi từ trạng thái i sang trạng thái j được ước lượng bằng tần suất tương đối:

$$\widehat{P_{ij}} = \frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{jk}} \quad (2)$$

3. PHÂN TÍCH ĐỘNG THÁI DỊCH CHUYỂN THỊ PHẦN GIỮA CÁC BẾN CẢNG CONTAINER TẠI CẢNG HẢI PHÒNG

3.1. Diễn biến tổng quan

Tổng sản lượng container Hải Phòng tăng từ 1.386.000 TEU (2008) lên 8.203.618 TEU (2025); số bến cảng hoạt động đồng thời tăng từ 5 lên 17. Chỉ số HHI giảm liên tục và mạnh trong giai đoạn đầu trước khi ổn định trong suốt giai đoạn 2018 - 2025. Xu hướng phi tập trung hóa này nhất quán với phát hiện của Pham và cộng sự (2016) đối với cùng khu vực trong giai đoạn 2005 - 2014, đồng thời cho thấy xu hướng này tiếp diễn và ổn định hóa trong giai đoạn mở rộng tiếp theo (2018 - 2025).

3.2. Ma trận chuyển trạng thái

Bảng 2 trình bày ma trận xác suất chuyển đổi trạng thái thị phần tính trên toàn bộ 205 cặp năm liên tiếp giai đoạn 2008 - 2025.

Bảng 2. Ma trận xác suất chuyển đổi trạng thái thị phần (toàn kỳ 2008 - 2025)

Từ/ Đến	S1 - Nhỏ	S2 - Nhỏ vừa	S3 - Lớn vừa	S4 - Dẫn đầu
S1 - Nhỏ	0,848	0,087	0,065	0,000
S2 - Nhỏ vừa	0,154	0,692	0,135	0,019
S3 - Lớn vừa	0,000	0,259	0,667	0,074
S4 - Dẫn đầu	0,000	0,000	0,113	0,887

Kết quả cho thấy tính bền vị trí rất cao ở cả hai đầu phân phối: Một bến cảng thuộc nhóm S1 có 84,8% khả năng vẫn thuộc nhóm này ở năm kế tiếp, trong khi một bến cảng thuộc nhóm S4 có 88,7% khả năng duy trì vị trí dẫn đầu. Đáng chú ý, không quan sát nào cho thấy sự chuyển đổi trực tiếp giữa hai thái cực S1 và S4 - mọi dịch chuyển thị phần đều diễn ra tuần tự qua các nhóm liền kề, không có hiện tượng nhảy vọt vị thế cạnh tranh trong một năm.

3.3. So sánh động thái theo giai đoạn

Bảng 3. So sánh chỉ số linh động Shorrocks giữa hai giai đoạn.

Chỉ số	Giai đoạn 1 (2008 - 2017)	Giai đoạn 2 (2018 - 2025)
Số cặp chuyển đổi	102	103
P (S1→S1)	0,706	0,931
P (S4→S4)	0,912	0,842
Chỉ số Shorrocks	0,348	0,282

Phát hiện đáng chú ý nhất là chỉ số Shorrocks giảm từ 0,348 (giai đoạn 1) xuống 0,282 (giai đoạn 2): Thị trường trở nên bền vị thế hơn sau năm 2018, đặc biệt xác suất một bến cảng thuộc nhóm S1 tiếp tục ở lại nhóm này tăng từ 70,6% lên 93,1%. Cách diễn giải hợp lý là các bến cảng mới quy mô lớn (TC-HICT, Nam Đình Vũ) nhanh chóng thiết lập và duy trì vị trí dẫn đầu ngay sau khi gia nhập, trong khi nhóm bến cảng nhỏ, bao gồm cả các bến cảng cũ đang suy giảm thị phần và các bến cảng mới gia nhập ở quy mô nhỏ cũng có xu hướng ổn định ở nhóm thấp hơn.

3.4. Phân phối trạng thái ổn định dài hạn

Bảng 4. Phân phối trạng thái ổn định dài hạn

Trạng thái	Toàn kỳ	Giai đoạn 1	Giai đoạn 2
S1 - Nhỏ	28,2%	12,9%	52,6%
S2 - Nhỏ vừa	27,9%	27,9%	21,8%
S3 - Lớn vừa	23,7%	27,3%	16,8%
S4 - Dẫn đầu	20,2%	32,0%	8,9%

Nếu động thái chuyển đổi quan sát được trong giai đoạn 2 (2018 - 2025) tiếp diễn không đổi trong dài hạn, hơn một nửa số bến cảng (52,6%) về mặt lý thuyết sẽ rơi vào nhóm thị phần nhỏ, trong khi chỉ khoảng 8,9% duy trì ở nhóm dẫn đầu phản ánh một cấu trúc thị trường ngày càng phân tầng, với một nhóm nhỏ bến cảng nắm giữ phần lớn thị phần một cách ổn định, còn phần lớn bến cảng còn lại bao gồm cả các bến cảng mới liên tục gia nhập vận hành ở quy mô nhỏ.

3.5. Mô hình gia nhập thị trường của bến cảng mới

Kết quả cho thấy đa số bến cảng mới đều gia nhập thị trường ở nhóm thị phần nhỏ hoặc nhỏ-vừa, sau đó tăng trưởng dần và vươn lên vị trí dẫn đầu trong khoảng 5 - 7 năm. Đây là bằng chứng phù hợp với mô hình điển hình của các bến cảng nước sâu tại Lạch Huyện - quá trình xây dựng khách hàng (hãng tàu, chủ hàng) và uy tín khai thác thường đòi hỏi một lộ trình tăng trưởng nhiều năm chứ không diễn ra tức thời. Trường hợp ngoại lệ duy nhất trong mẫu là bến cảng HHIT (Hateco), gia nhập trực tiếp vào nhóm S3 - ngay năm đầu hoạt động (2025) phản ánh lợi thế từ vị trí chiến lược trong khu vực cảng nước sâu Lạch Huyện, khả năng tiếp nhận tàu lớn và chính sách hợp tác hãng tàu mang lại hiệu quả tích cực ngay từ giai đoạn đầu.

3.6. Động thái rút lui khỏi thị trường

Hai bến cảng rút lui khỏi mẫu quan sát trong giai đoạn nghiên cứu (Đoạn Xá và Transvina) đều trải qua quá trình suy giảm thị phần dần dần trước khi ngừng ghi nhận dữ liệu vào năm 2020, với thị phần năm cuối lần lượt chỉ còn 0,22% và 0,07% (đều thuộc nhóm S1 - Nhỏ). Quá trình rút lui "từ từ" này phù hợp với đặc điểm không có sự chuyển đổi trực tiếp giữa các trạng thái xa nhau đã quan sát được ở ma trận chuyển đổi toàn kỳ.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu phác họa một bức tranh hai lớp về động thái cạnh tranh tại cụm cảng Hải Phòng. Ở lớp thứ nhất - mức độ tập trung tổng thể (đo bằng HHI) - thị trường đã trải qua quá trình phi tập trung hóa rõ rệt và bền vững, phù hợp với xu hướng chung được ghi nhận ở nhiều hệ thống cảng biển khác khi có thêm bến cảng mới gia nhập. Ở lớp thứ hai - động thái vi mô về xác suất chuyển đổi vị thế giữa các bến cảng cụ thể - bức tranh phức tạp hơn: Mức độ linh động thực tế lại giảm đi trong giai đoạn có nhiều bến cảng mới gia nhập nhất. Hai phát hiện này không mâu thuẫn nhau mà bổ sung cho nhau: Thị trường có thể đồng thời trở nên ít tập trung hơn về mặt phân bổ thị phần tổng thể, trong khi vị thế tương đối của từng terminal riêng lẻ lại trở nên ổn định hơn bởi vì các bến cảng mới lớn nhanh chóng chiếm lĩnh và giữ vững vị trí cao, còn nhóm bến cảng nhỏ (cả cũ lẫn mới) cũng dần ổn định ở phân khúc thấp hơn thay vì cạnh tranh giành giật vị trí lẫn nhau.

Phân phối trạng thái ổn định dài hạn ở giai đoạn 2 cho thấy nguy cơ phân mảnh quá mức: Nếu tiếp tục cấp phép nhiều bến cảng quy mô nhỏ mà không có định hướng về công suất tối thiểu, thị trường có thể tiến tới một cấu trúc với đa số bến cảng hoạt động ở quy mô nhỏ, tiềm ẩn rủi ro về hiệu quả khai thác và cạnh tranh không lành mạnh về giá.

Thứ hai, quỹ đạo tăng trưởng của TC-HICT và Nam Đình Vũ - từ nhóm thị phần nhỏ/nhỏ-vừa khi gia nhập (2018) lên vị trí dẫn đầu hệ thống chỉ sau 7 năm - có thể được xem là một tham chiếu điển hình hữu ích cho cơ quan quản lý khi thẩm định các dự án bến cảng nước sâu mới, đồng thời cũng là thông tin tham khảo cho nhà đầu tư trong việc hoạch định kế hoạch kinh doanh, lập báo cáo đầu tư phát triển cảng và tính toán dòng tiền giai đoạn đầu vận hành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bui, Thanh Uyen., Cho, Gyu Sung. Efficiency analysis of container ports in Vietnam using stochastic frontier analysis. Journal of Ocean Engineering and Technology, 39(1), 56-62, 2025.

[2] Chiba T, Hino H, Akaho S, Murata N. Time-Varying Transition Probability Matrix Estimation and Its Application to Brand Share Analysis. PLoS ONE 12(1): e0169981, 2017, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169981.

[3] Le, P. T., & Nguyen, H.-O. Influence of policy, operational and market conditions on seaport efficiency in newly emerging economies: The case of Vietnam. Applied Economics, 52(43), 4698-4710, 2020.

[4] Le, Y., & Ieda, H. Modified Herfindahl-Hirschman index for measuring the concentration degree of container port systems. Transportation Research Record, 2166(1), 47-54, 2010.

[5] Nguyen, P. N., Woo, S.-H., Beresford, A., & Pettit, S. Competition, market concentration and relative efficiency of major container ports in Southeast Asia. Journal of Transport Geography, 83, 102653, 2020.

[6] Nguyen, T. L. H., Park, S.-H., Kim, Y., & Yeo, G.-T. An efficiency analysis of container terminals in Southern Vietnam using DEA dynamic efficiency evaluation. Asian Journal of Shipping and Logistics, 37(4), 329-336, 2021.

[7] Notteboom, T. E. Traffic inequality in seaport systems revisited. Journal of Transport Geography, 14(2), 95-108, 2006.

[8] Pham, T. Y., Jeon, J. W., Dang, V. L., Cha, Y. D., & Yeo, G. T. A longitudinal analysis of concentration developments for container terminals in Northern Vietnam. Asian Journal of Shipping and Logistics, 32(3), 157-164, 2016.

[9] Shorrocks, A. F. Income inequality and income mobility. Journal of Economic Theory, 19(2), 376-393, 1978.

[10] Wang, C.-N., Nguyen, P.-H., Nguyen, T.-L., Nguyen, T.-G., Nguyen, D.-T., Tran, T.-H., Le, H.-C., & Phung, H.-T. A two-stage DEA approach to measure operational efficiency in Vietnam's port industry. Mathematics, 10(9), 1385, 2022.

■ Ngày nộp bài: 18/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 28/8/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 17/9/2026

Nghiên cứu các yếu tố rủi ro liên quan đến cộng đồng dân cư trong dự án đầu tư xây dựng công trình giao thông sử dụng vốn đầu tư công tại Việt Nam

A study of project risk factors related to local communities in publicly funded transport infrastructure projects in Vietnam

> THS 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 cộng đồng dân cư khu vực dự án trong các dự án xây dựng công trình giao thông (CTGT) sử dụng vốn đầu tư công (ĐTC) tại Việt Nam. Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng hợp tài liệu, phân tích nội dung khung pháp lý về đất đai, bồi thường, hỗ trợ, tái định cư, tiếp cận thông tin, khiếu nại và khởi kiện hành chính, kết hợp đối chiếu với thực tiễn triển khai dự án. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác lập quy tắc phân định giữa chủ thể nơi rủi ro chủ yếu hình thành hoặc biểu hiện và chủ thể chịu trách nhiệm kiểm soát, đồng thời xác định 4 nhóm nội dung tương tác dự án - cộng đồng và danh mục 4 yếu tố rủi ro. Các yếu tố được diễn giải trên cơ sở nội hàm, căn cứ pháp lý và điều kiện hình thành tương ứng. Kết quả nghiên cứu bổ sung cơ sở cho cách tiếp cận quản lý rủi ro theo chủ thể trong quan hệ giữa dự án và cộng đồng, đồng thời cung cấp danh mục đầu vào cho các bước sàng lọc và phân tích định lượng tiếp theo.

Từ khóa: Rủi ro dự án; cộng đồng dân cư khu vực dự án; rủi ro xã hội; bồi thường, hỗ trợ, tái định cư; dự án sử dụng vốn đầu tư công; quản lý rủi ro theo chủ thể.

ABSTRACT

This paper identifies risk factors related to local communities in project areas of transport infrastructure construction projects financed by public investment in Vietnam. The study employs literature synthesis and content analysis of the legal framework governing land, compensation, support and resettlement, access to information, complaints and administrative litigation, combined with a review of project implementation practice. On this basis, the study establishes a rule for distinguishing between the stakeholders in which a risk primarily arises or manifests and the stakeholder responsible for its control, while identifying four groups of interaction between the project and local communities and a set of four risk factors. Each factor is interpreted in terms of its content, legal basis and corresponding conditions of formation. The findings provide further support for a stakeholder-based approach to risk management in relations between the project and local communities and provide an input risk set for subsequent screening and quantitative analysis.

Keywords: Project risk; local communities; social risk; compensation, support and resettlement; public investment project; stakeholder-based risk management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các dự án xây dựng CTGT sử dụng vốn ĐTC đóng vai trò chủ đạo trong phát triển kết cấu hạ tầng giao thông tại Việt Nam, góp phần thúc đẩy tăng trưởng kinh tế, kết nối vùng miền và nâng cao chất lượng sống của người dân. Đặc trưng của nhóm dự án này là quy mô và tổng mức đầu tư lớn, thời gian thực hiện dài, phạm vi triển khai qua nhiều địa bàn và chịu sự điều chỉnh của nhiều hệ thống pháp luật về ĐTC, xây dựng, đấu thầu, ngân sách nhà nước, đất đai và môi trường. So với các công trình triển khai trong phạm vi khuôn viên khép kín, dự án CTGT thường có phạm vi tuyến dài, đi qua các khu dân cư hiện hữu và phát sinh nhu cầu thu hồi đất, bồi thường, hỗ trợ, tái định cư trên diện rộng. Vì vậy, cộng đồng dân cư khu vực dự án là nhóm chủ thể chịu tác động trực tiếp trong quá trình chuẩn bị và thực hiện dự án.

Thực tiễn triển khai các dự án đầu tư xây dựng tại Việt Nam cho thấy chậm giải phóng mặt bằng có thể kéo dài thời gian thực hiện dự án [1]. Các nghiên cứu về rủi ro dự án trong bối cảnh Việt Nam cũng ghi nhận nhiều yếu tố liên quan đến tổ chức thực hiện và điều kiện địa phương có ảnh hưởng đến kết quả dự án [2, 3]. Các nghiên cứu quốc tế cho thấy thái độ, mức độ chấp nhận và phản ứng của cộng đồng cũng như các bên liên quan bên ngoài có thể ảnh hưởng đến quá trình thực hiện dự án, đặc biệt khi các phản đối kéo dài [4, 5]. Đồng thời, nhận thức của các bên liên quan được xem là một thành phần cần được xem xét trong đánh giá rủi ro dự án hạ tầng [6].

Các nghiên cứu hiện hành về rủi ro dự án xây dựng thường phân loại rủi ro theo bản chất như kỹ thuật, tài chính, pháp lý, tiến độ hoặc môi trường. Hướng tiếp cận này có giá trị trong phân tích đặc tính rủi ro, nhưng chưa làm rõ mối liên hệ giữa từng rủi ro với chủ thể có thẩm quyền và trách nhiệm kiểm soát tương ứng trong dự án có nhiều bên tham gia. Trong khi đó, một số nghiên cứu đã tích hợp thuộc tính và nhận thức của các bên liên quan vào đánh giá và giảm thiểu rủi ro dự án [6, 7], nhưng chưa tập trung vào việc phân định giữa nơi rủi ro hình thành và chủ thể chịu trách nhiệm kiểm soát trong bối cảnh dự án sử dụng vốn ĐTC tại Việt Nam. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về ĐTC và dự án hạ tầng giao thông đã chỉ ra ảnh hưởng của công tác lập kế hoạch đến hiệu quả hoạt động quản lý nhà nước và ảnh hưởng của hành vi tổ chức dự án đến chất lượng công trình [8, 9]; các nghiên cứu này chủ yếu xem xét các chủ thể trực tiếp vận hành dự án, chưa xử lý riêng nhóm chủ thể chịu tác động. Đối với cộng đồng dân cư, mối liên hệ giữa chủ thể và rủi ro có tính chất khác biệt. Cộng đồng không trực tiếp thực hiện nghĩa vụ quản lý dự án theo quy định pháp luật hoặc hợp đồng, nhưng là nơi nhiều rủi ro xã hội hình thành và có thể quan sát qua các biểu hiện cụ thể. Trên cơ sở đó, bài báo tập trung nhận diện các yếu tố rủi ro thuộc nhóm cộng đồng dân cư khu vực dự án trong các dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC tại Việt Nam, đồng thời xác lập nguyên tắc phân định giữa chủ thể nơi rủi ro chủ yếu hình thành hoặc biểu hiện và chủ thể chịu trách nhiệm kiểm soát.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ PHƯƠNG PHÁP NHẬN DIỆN RỦI RO

Nghiên cứu sử dụng các phương pháp: Tổng hợp tài liệu nghiên cứu trong và ngoài nước; phân tích nội dung văn bản pháp lý để xác định quyền, nghĩa vụ và cơ chế tham gia của người dân trong quá trình thu hồi đất, bồi thường và thực hiện dự án và đối chiếu với thực tiễn triển khai dự án tại Việt Nam giai đoạn 2015 - 2025 để nhận diện các tình huống rủi ro biểu hiện tại cộng đồng dân cư khu vực dự án.

Nhóm tiêu chuẩn quản lý rủi ro gồm ISO 31000:2018 [10] và PMBOK [11], cung cấp định nghĩa rủi ro và các mục tiêu dự án. Nhóm lý thuyết các bên liên quan gồm Freeman [12] và mô hình mức độ nổi bật của Mitchell và cộng sự [13], làm căn cứ xác định vị thế của cộng đồng trong hệ thống dự án. Nhóm lý thuyết về công bằng thủ tục của Lind và Tyler [14] được sử dụng để diễn giải cơ chế hình thành đồng thuận và phản ứng của cộng đồng đối với các quyết định hành chính có ảnh hưởng đến quyền lợi. Nhóm nghiên cứu thực nghiệm gồm các công trình về quản lý các bên liên quan, phản đối cộng đồng và rủi ro theo chủ thể trong dự án xây dựng [4-7], [15] cùng các nghiên cứu trong bối cảnh Việt Nam [2, 3, 8, 9], được dùng để đối chiếu với bối cảnh dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC tại Việt Nam.

Các văn bản pháp lý xác lập quyền, cơ chế tham gia và cơ chế bảo vệ quyền lợi của người dân gồm Luật Đất đai [16] và Nghị quyết số 254/2025/QH15 về cơ chế, chính sách tháo gỡ khó khăn, vướng mắc trong tổ chức thi hành Luật Đất đai [17]; Nghị định số 88/2024/NĐ-CP về bồi thường, hỗ trợ, tái định cư khi Nhà nước thu hồi đất cùng các văn bản điều chỉnh, phân cấp và hướng dẫn có liên quan [18]; Bộ luật Dân sự [19]; Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở [20]; Luật Tiếp cận thông tin [21]; Luật Bảo vệ môi trường [22]; Luật Khiếu nại [23], Luật Tố cáo [24] và Luật Tố tụng hành chính [25]. Khung pháp lý về ĐTC và xây dựng [26, 27] được sử dụng để xác định thẩm quyền và trách nhiệm tổ chức thực hiện của cơ quan quản lý nhà nước và chủ đầu tư trong quan hệ với cộng đồng.

Các yếu tố rủi ro chỉ được đưa vào danh mục R1-R4 khi đồng thời đáp ứng 5 tiêu chí. Thứ nhất, yếu tố đó phải chứa đựng tính bất định và có khả năng tác động đến mục tiêu dự án [10, 11]. Thứ hai, rủi ro phải có biểu hiện tại cộng đồng dân cư khu vực dự án về pháp lý, nhận thức, thái độ hoặc hành vi hợp pháp, qua đó phân biệt với rủi ro thuộc các nhóm chủ thể khác. Thứ ba, yếu tố phải gắn với đặc thù thu hồi đất, bồi thường, hỗ trợ, tái định cư hoặc tổ chức thi công của dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC. Thứ tư, yếu tố phải có khả năng đánh giá trực tiếp bằng thang ngôn ngữ trong khảo sát chuyên gia và không phải là hệ quả tổng hợp như chậm tiến độ hoặc tăng chi phí. Thứ năm, tên gọi và nội hàm của yếu tố được chuẩn hóa theo thuật ngữ pháp lý và quản lý dự án tại Việt Nam.

Do đặc thù của nhóm chủ thể này, danh mục áp dụng thêm một quy tắc phân định: Mã hóa yếu tố rủi ro theo chủ thể nơi rủi ro chủ yếu hình thành hoặc biểu hiện, tách khỏi chủ thể có trách nhiệm kiểm soát. Một yếu tố được xếp vào nhóm R khi rủi ro hình thành hoặc biểu hiện trực tiếp tại cộng đồng hoặc trong quan hệ giữa dự án và cộng đồng. Theo quy tắc này, nhóm R xác định vị trí biểu hiện của rủi ro; trách nhiệm phòng ngừa và xử lý được xác định riêng, thuộc cơ quan có thẩm quyền và chủ đầu tư theo phạm vi thẩm quyền và khả năng can thiệp.

3. KẾT QUẢ NHẬN DIỆN VÀ THẢO LUẬN

Vận dụng mô hình mức độ nổi bật của Mitchell và cộng sự [13], cộng đồng dân cư khu vực dự án có tính chính danh cao, xuất phát từ quyền sử dụng đất, quyền sở hữu tài sản và quyền được tham gia, được thông tin theo pháp luật, đồng thời có tính cấp thiết cao vì lợi ích bị ảnh hưởng trực tiếp và tức thời. Trong khi đó, nhóm này không trực tiếp nắm quyền lực đối với các quyết định của dự án, nên các yêu cầu hợp pháp của cộng đồng cần được xử lý thông qua thẩm quyền của cơ quan nhà nước và chủ đầu tư. Đặc điểm này cung cấp cơ sở lý giải cách nhóm R có thể ảnh hưởng đến dự án: Khi các yêu cầu của cộng đồng được tiếp nhận và giải quyết kịp thời thông qua các cơ chế thể chế, rủi ro có thể được hạn chế trong khuôn khổ hành chính; khi quá trình xử lý kéo dài hoặc chưa thỏa đáng, các vấn đề có thể phát triển thành kiến nghị, khiếu nại, khởi kiện hoặc các hành vi hợp pháp khác, qua đó ảnh hưởng đến bàn giao mặt bằng và tiến độ thực hiện dự án.

Lý thuyết công bằng thủ tục bổ sung cơ sở giải thích cho quá trình hình thành đồng thuận của cộng đồng. Theo Lind và Tyler, sự chấp nhận đối với một quyết định ảnh hưởng đến quyền lợi không chỉ phụ thuộc vào kết quả nhận được mà còn dựa trên cách thức quyết định được hình thành, đặc biệt là cơ hội trình bày ý kiến, tính nhất quán trong áp dụng quy tắc và mức độ minh bạch của thông tin [14]. Cách tiếp cận này lý giải vì sao các dự án áp dụng cùng chính sách bồi thường vẫn có thể đạt mức độ đồng thuận khác nhau, đồng thời cho thấy công khai thông tin và tham vấn có ảnh hưởng riêng đến phản ứng của cộng đồng, không phụ thuộc hoàn toàn vào mức bồi thường. Điều này phù hợp với các nghiên cứu về quản lý bên liên quan trong dự án xây dựng, trong đó trao đổi thông tin và nhận diện nhu cầu, ràng buộc của các bên được xem là những nhân tố thành công quan trọng [15]. Khi phản ứng tập thể đã hình thành, nhận thức rủi ro chung và các quan hệ xã hội trong cộng đồng có thể duy trì và khuếch đại sự phản đối [5]. Qua đó, công khai thông tin, tham vấn và xử lý kiến nghị là các nội dung cần được chú trọng trong quản lý quan hệ giữa dự án và cộng đồng.

Bảng 1. Khung phân tích các nhóm nội dung tương tác giữa dự án và cộng đồng

Mã	Nhóm nội dung tương tác	Mô tả nội dung	Căn cứ pháp lý	Yếu tố rủi ro liên quan
D1	Quyền và lợi ích hợp pháp về đất đai	Trạng thái pháp lý của quyền sử dụng đất, ranh giới, nguồn gốc đất và quyền sở hữu tài sản gắn liền với đất của người dân trong phạm vi thu hồi đất phục vụ dự án	Luật Đất đai [16]; Bộ luật Dân sự [19]	R1
D2	Đồng thuận đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư	Mức độ đồng thuận của người có đất bị thu hồi và người có quyền lợi liên quan đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư	Luật Đất đai [16]; Nghị quyết 254/2025 [17]; Nghị định 88/2024 [18]; Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở [20]	R2
D3	Công bố và phản hồi thông tin dự án	Mức độ đầy đủ, kịp thời, dễ tiếp cận của thông tin do cơ quan có thẩm quyền và chủ ĐTC bố về phạm vi ảnh hưởng, kế hoạch thu hồi đất, chính sách bồi thường, biện pháp thi công, tác động môi trường; trạng thái tiếp nhận, phản hồi của cộng đồng đối với thông tin đó	Luật Tiếp cận thông tin [21]; Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở [20]; Luật Bảo vệ môi trường [22]	R3
D4	Thực hiện quyền khiếu nại, tố cáo và khởi kiện hành chính	Việc người dân lựa chọn và duy trì các hình thức khiếu nại, tố cáo, khởi kiện hành chính đối với quyết định, hành vi hành chính liên quan đến thu hồi đất, bồi thường, tái định cư và tác động của dự án	Luật Khiếu nại [23]; Luật Tố cáo [24]; Luật Tố tụng hành chính [25]; Luật Đất đai [16]	R4

Trên cơ sở 4 nhóm nội dung tương tác D1-D4, nghiên cứu xác lập 4 yếu tố rủi ro của nhóm R, ký hiệu R1-R4.

Nhóm D1 phản ánh trạng thái pháp lý của quyền sử dụng đất và tài sản trong phạm vi thu hồi. Theo Luật Đất đai [16] và Bộ luật Dân sự [19], việc xác định chủ thể có quyền, ranh giới, nguồn gốc sử dụng đất và tài sản gắn liền với đất là cơ sở để lập phương án bồi thường và thu hồi đất. Trong các dự án CTGT có tuyến đi qua nhiều địa bàn, hồ sơ địa chính phức tạp, chuyển quyền chưa đăng ký, thừa kế chưa phân chia hoặc sai lệch ranh giới có thể làm phát sinh tranh chấp hoặc yêu cầu về quyền lợi chồng lấn, kéo dài việc xác định đối tượng được bồi thường và bàn giao mặt bằng, từ đó hình thành R1 - Tranh chấp quyền sử dụng đất và tài sản gắn liền với đất. Việc xử lý R1 phụ thuộc vào thủ tục hòa giải và giải quyết tranh chấp theo pháp luật nên thời gian xử lý có thể khó dự báo.

Nhóm D2 phản ánh mức độ đồng thuận của người dân đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư. Pháp luật quy định việc lấy ý kiến, đối thoại và xử lý các vướng mắc trong quá trình lập, thực hiện phương án [16-18], [20]. Mức độ đồng thuận phụ thuộc không chỉ vào giá trị bồi thường mà còn vào cảm nhận về tính công bằng của thủ tục, khả năng tham gia ý kiến và tính nhất quán trong áp dụng chính sách [14]. Khi mức độ đồng thuận thấp hoặc bất đồng kéo dài, việc bàn giao mặt bằng có thể bị gián đoạn theo từng đoạn tuyến, hình thành R2 - Thiếu đồng thuận của người dân đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư.

Nhóm D3 phản ánh hoạt động trao đổi thông tin giữa dự án và cộng đồng, trên cơ sở quyền tiếp cận thông tin, công khai, lấy ý kiến và tham vấn cộng đồng theo quy định pháp luật [20-22]. Thông tin được cung cấp sớm, nhất quán và có kênh phản hồi có thể thu hẹp khoảng cách kỳ vọng; ngược lại, thông tin thiếu hoặc chậm làm gia tăng nhận thức rủi ro và giảm mức độ đồng thuận [5, 14], từ đó hình thành R3 - Tính đầy đủ, kịp thời của công tác trao đổi thông tin. Do R3 nằm ở ranh giới giữa nhóm R với cơ quan quản lý nhà nước và chủ đầu tư, yếu tố được xếp vào nhóm R ở khía cạnh trạng thái tiếp nhận và phản hồi thông tin của cộng đồng; trách nhiệm công bố và cung cấp thông tin vẫn thuộc các chủ thể quản lý theo thẩm quyền.

Nhóm D4 phản ánh việc thực hiện quyền khiếu nại, tố cáo và khởi kiện hành chính của người dân khi không đồng ý với quyết định hoặc hành vi liên quan đến dự án [16], [23-25]. Đây là các cơ chế pháp lý bảo vệ quyền và lợi ích hợp pháp của cộng đồng; bản thân việc thực hiện các quyền này không phải là rủi ro. Rủi ro đối với dự án xuất hiện khi tình trạng khiếu nại, tố cáo hoặc khởi kiện kéo dài, chưa được giải quyết dứt điểm và ảnh hưởng đến thu hồi đất hoặc bàn giao mặt bằng, từ đó hình thành R4 - Khiếu nại, tố cáo và khởi kiện hành chính kéo dài của người dân.

Bảng 2. Các yếu tố rủi ro liên quan đến cộng đồng dân cư khu vực dự án (nhóm R) trong dự án xây dựng CTGT sử dụng vốn ĐTC

STT	Mã	Nhóm nội dung tương tác	Tên yếu tố rủi ro	Nội dung
1	**R1**	D1 - Quyền và lợi ích hợp pháp về đất đai	Tranh chấp quyền sử dụng đất và tài sản gắn liền với đất	Tranh chấp về quyền sử dụng đất, ranh giới, nguồn gốc đất, quyền sở hữu tài sản gắn liền với đất hoặc quyền lợi giữa các bên liên quan trong khu vực dự án
2	**R2**	D2 - Đồng thuận đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư	Thiếu đồng thuận của người dân đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư	Mức độ không đồng thuận của người có đất bị thu hồi và người có quyền lợi liên quan đối với phương án bồi thường, hỗ trợ, tái định cư
3	**R3**	D3 - Công bố và phản hồi thông tin dự án (trường hợp ranh giới)	Tính đầy đủ, kịp thời của công tác trao đổi thông tin	Mức độ đầy đủ, kịp thời, dễ tiếp cận của thông tin được công bố về mục tiêu, phạm vi ảnh hưởng, kế hoạch thu hồi đất, chính sách bồi thường, biện pháp thi công và tác động môi trường của dự án, cùng trạng thái tiếp nhận và phản hồi thông tin của cộng đồng

4	**R4**	D4 - Thực hiện quyền khiếu nại, tố cáo và khởi kiện hành chính	Khiếu nại, tố cáo và khởi kiện hành chính kéo dài của người dân	Tình trạng khiếu nại, tố cáo hoặc khởi kiện hành chính kéo dài của người dân liên quan đến thu hồi đất, bồi thường, hỗ trợ, tái định cư, ảnh hưởng thi công, môi trường sống hoặc an toàn

Các yếu tố nhóm R có thể ảnh hưởng đến quá trình bàn giao và duy trì mặt bằng thi công, qua đó tác động đến tiến độ và các mục tiêu liên quan của dự án.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã xác lập quy tắc phân định giữa chủ thể nơi rủi ro hình thành hoặc biểu hiện và chủ thể chịu trách nhiệm kiểm soát, đồng thời nhận diện bốn yếu tố rủi ro nhóm R, ký hiệu R1-R4, trong các dự án CTGT sử dụng vốn ĐTC tại Việt Nam. Danh mục bao quát các vấn đề về quyền và lợi ích đất đai, mức độ đồng thuận, trao đổi thông tin và việc thực hiện quyền khiếu nại, tố cáo, khởi kiện hành chính. Cách tiếp cận này giúp phân biệt rủi ro liên quan đến cộng đồng với trách nhiệm kiểm soát của các chủ thể quản lý dự án, qua đó tập trung biện pháp kiểm soát vào các điều kiện làm phát sinh hoặc gia tăng rủi ro. Danh mục R1-R4 cung cấp đầu vào cho các bước sàng lọc, phân tích quan hệ ảnh hưởng và xác định mức độ ưu tiên trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng. Chỉ thị số 04/CT-BXD ngày 28/02/2026 về việc tăng cường công tác quản lý trong hoạt động đầu tư xây dựng và quản lý, vận hành, khai thác, bảo trì công trình xây dựng nhằm chủ động phòng ngừa, ngăn chặn lãng phí, góp phần sử dụng hiệu quả nguồn lực và hiệu quả đầu tư các dự án, Hà Nội, 2026.

[2] 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) - ĐHXD, số 15(3V), tr. 177-185, 2021, doi: 10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-15.

[3] T. P. Nguyen and N. Chileshe. Revisiting the critical factors causing failure of construction projects in Vietnam. In Proc. 29th Annual ARCOM Conference, Reading, UK, Sep. 2013, pp. 929-938.

[4] S. Olander and A. Landin. Evaluation of stakeholder influence in the implementation of construction projects. International Journal of Project Management, vol. 23, no. 4, pp. 321-328, 2005, doi: 10.1016/j.ijproman.2005.02.002.

[5] M. Teo and M. Loosemore. Community-based protest against construction projects: a case study of movement continuity. Construction Management and Economics, vol. 29, no. 2, pp. 131-144, 2011, doi: 10.1080/01446193.2010.535545.

[6] 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.

[7] N. Xia, J. Guo and Y.-H. Lin. Managing stakeholder attributes 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.

[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) - ĐHXD, số 13(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, no. 71(5), pp. 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 (tái bản từ bản gốc Pitman, 1984).

[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] E. A. Lind and T. R. Tyler. The Social Psychology of Procedural Justice. New York: Plenum Press, 1988.

[15] J. Yang, G. Q. Shen, M. Ho, D. S. Drew and A. P. C. Chan. Exploring critical success factors for stakeholder management in construction projects. Journal of Civil Engineering and Management, vol. 15, no. 4, pp. 337-348, 2009, doi: 10.3846/1392-3730.2009.15.337-348.

[16] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 133/VBHN-VPQH ngày 03/09/2025: Luật Đất đai, Hà Nội, 2025.

[17] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Nghị quyết số 254/2025/QH15 ngày 11/12/2025 quy định một số cơ chế, chính sách tháo gỡ khó khăn, vướng mắc trong tổ chức thi hành Luật Đất đai, có hiệu lực từ ngày 01/01/2026, Hà Nội, 2025.

[18] Chính phủ. Nghị định số 88/2024/NĐ-CP ngày 15/7/2024 quy định về bồi thường, hỗ trợ, tái định cư khi Nhà nước thu hồi đất; Nghị định số 151/2025/NĐ-CP ngày 12/6/2025 quy định về phân định thẩm quyền của chính quyền địa phương 2 cấp, phân quyền, phân cấp trong lĩnh vực đất đai; Nghị định số 226/2025/NĐ-CP ngày 15/8/2025 sửa đổi, bổ sung một số điều của các nghị định quy định chi tiết thi hành Luật Đất đai; Nghị định số 49/2026/NĐ-CP ngày 31/01/2026 quy định chi tiết và hướng dẫn một số điều của Nghị quyết số 254/2025/QH15, Hà Nội, 2024-2026.

[19] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Bộ luật Dân sự số 91/2015/QH13 ngày 24/11/2015, có hiệu lực từ ngày 01/01/2017, Hà Nội, 2015.

[20] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Thực hiện dân chủ ở cơ sở số 10/2022/QH15 ngày 10/11/2022, có hiệu lực từ ngày 01/7/2023, Hà Nội, 2022.

[21] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Tiếp cận thông tin số 104/2016/QH13 ngày 06/4/2016, có hiệu lực từ ngày 01/7/2018; Luật Tiếp cận thông tin số 01/2026/QH16 ngày 23/4/2026, có hiệu lực từ ngày 01/9/2026, Hà Nội, 2016, 2026.

[22] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14 ngày 17/11/2020; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 146/2025/QH15, có hiệu lực từ ngày 01/01/2026, Hà Nội, 2020, 2025.

[23] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Khiếu nại số 02/2011/QH13 ngày 11/11/2011; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật Tiếp công dân số 42/2013/QH13 và Luật số 136/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Tiếp công dân, Luật Khiếu nại, Luật Tố cáo, có hiệu lực từ ngày 01/7/2026, Hà Nội, 2011, 2013, 2025.

[24] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Tố cáo số 25/2018/QH14 ngày 12/6/2018; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 136/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Tiếp công dân, Luật Khiếu nại, Luật Tố cáo, có hiệu lực từ ngày 01/7/2026, Hà Nội, 2018, 2025.

[25] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Tố tụng hành chính số 93/2015/QH13 ngày 25/11/2015; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 55/2019/QH14 và Luật số 85/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Bộ luật Tố tụng dân sự, Luật Tố tụng hành chính, Luật Tư pháp người chưa thành niên, Luật Phá sản và Luật Hòa giải, đối thoại tại Tòa án, có hiệu lực từ ngày 01/7/2025, Hà Nội, 2015, 2019, 2025.

[26] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Đầu tư công số 58/2024/QH15, Hà Nội, 2024; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật số 90/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Đầu tư công, 2025.

[27] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15, ban hành ngày 10/12/2025, có hiệu lực từ ngày 01/7/2026, Hà Nội, 2025.

■ Ngày nộp bài: 03/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 08/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 17/9/2026

Năng lực thu hút và duy trì tuyến tàu tại Cảng Tân Cảng Hiệp Phước: Bằng chứng từ dữ liệu khai thác

Capability to attract and retain liner services at Tancang Hiep Phuoc Port: Evidence from operating data

> THS TRẦN THỊ XUÂN THU
Phòng Điều độ, Cảng Tân Cảng Hiệp Phước
Email: nhaxuan0211@gmail.com

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá năng lực thu hút và duy trì tuyến dịch vụ tàu biển của Cảng Tân Cảng Hiệp Phước (TCHP) trên cơ sở nghiên cứu tình huống, dữ liệu khai thác và khung 4 nhóm năng lực gồm: Điều kiện hàng hải-cầu bến; hiệu suất, độ tin cậy và số hóa khai thác; nguồn hàng và dịch vụ giá trị gia tăng; kết nối hậu phương và mạng lưới cảng. Kết quả cho thấy sản lượng tăng từ 169.271 TEU năm 2024 lên 316.364 TEU năm 2025; số chuyến tăng từ 240 lên 434; sản lượng bình quân tăng từ 705 lên 729 TEU/chuyến, trong khi chỉ số Herfindahl-Hirschman (dùng để đo mức độ tập trung - HHI) giảm từ 0,181 xuống 0,136. Điều này phản ánh khả năng hấp thụ đồng thời sự gia tăng tần suất khai thác và quy mô hàng trên chuyến, cũng như xu hướng đa dạng hóa danh mục hãng/tuyến. Tuy nhiên, sản lượng những tháng đầu năm 2026 giảm 5,2% so với cùng kỳ, sản lượng bình quân còn 713, trong khi tỷ trọng ba hãng/tuyến lớn nhất tăng lên 56,9%, cho thấy thách thức trọng tâm đã chuyển từ thu hút ban đầu sang duy trì ổn định tuyến. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất 4 nhóm giải pháp: Phát triển nguồn hàng theo hành lang; thiết lập cam kết mức dịch vụ theo tuyến; nâng độ tin cậy của kết nối sà lan trong hệ thống và quản trị danh mục tuyến bằng chỉ số đánh giá hiệu quả hoạt động KPI 3, 6, 12 tháng.

Từ khóa: Năng lực thu hút tuyến tàu; duy trì tuyến dịch vụ; lựa chọn cảng; kết nối hậu phương; Tân Cảng Hiệp Phước.

ABSTRACT

This study evaluates Tan Cang Hiep Phuoc Port's capability to attract and retain liner services using a case-study approach, operating data and a four-pillar framework covering nautical and berth capability; operational efficiency, reliability and digitalization; cargo base and value-added services; hinterland and port-network connectivity. Throughput increased from 169,271 TEU in 2024 to 316,364 TEU in 2025; port calls rose from 240 to 434; TEU per call increased from 705 to 729; HHI declined from 0.181 to 0.136. These results indicate an ability to absorb higher service frequency while maintaining cargo density and diversifying the carrier/service portfolio. Nevertheless, throughput in the first eight months of 2026 fell by 5.2% year on year, TEU per call declined to 713 and the top three share rose to 56.9%, suggesting that the main challenge has shifted from initial attraction to stable service retention. The study proposes corridor-based cargo development, route-specific service-level commitments, reliable system-wide barge connectivity and portfolio governance using 3, 6 and 12 month performance indicators.

Keywords: Liner service attraction; service retention; port choice; hinterland connectivity; Tan Cang Hiep Phuoc.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong cạnh tranh cảng container, khả năng thu hút tuyến tàu không chỉ phụ thuộc vào quy mô cầu bến hay mức giá niêm yết. Hãng tàu đánh giá đồng thời khả năng tiếp nhận tàu, nguồn hàng, thời gian giải phóng tàu, độ tin cậy lịch khai thác, chi phí toàn hành trình và mức độ kết nối với mạng cảng và hậu phương [1, 3]. Một cảng có thể thu hút được tuyến thử nghiệm nhưng chưa chắc duy trì được tuyến nếu quy mô hàng trên mỗi chuyến thấp, lịch sà lan không ổn định hoặc chi phí phát sinh làm mất lợi thế vị trí.

TCHP nằm trên sông Soài Rạp, tại giao điểm giữa khu vực phía Nam TP.HCM, Đồng bằng sông Cửu Long và mạng cảng Tân Cảng Sài Gòn. Cảng có 420 m cầu tàu, bến sà lan, khoảng 17 ha bãi, năng lực tiếp nhận tàu 50.000 DWT đầy tải và 70.000 DWT giảm tải, cùng hệ thống hỗ trợ quản lý và khai thác cảng như TOPX/TOPO, E-port và eDO. Các đặc điểm này tạo nền tảng cho vai trò cảng cửa ngõ phía Nam Thành phố, điểm gom hàng và nút phân tải giữa Cát Lái và Cái Mép. Trong giai đoạn 2020 - 2026, sản lượng và cơ cấu tuyến tại TCHP biến động đáng kể, đặc biệt là mức tăng mạnh trong năm 2025 và sự điều chỉnh trong những tháng đầu năm 2026. Diễn biến này đặt ra yêu cầu đánh giá cả hai phương diện: Khả năng đưa tuyến mới vào khai thác và khả năng duy trì tuyến sau giai đoạn khởi động. Vì vậy, nghiên cứu tập trung trả lời ba câu hỏi: Một là năng lực thu hút và duy trì tuyến của TCHP được thể hiện như thế nào qua nguồn lực và kết quả khai thác; hai là những điểm mạnh và khoảng trống nào đang chi phối tính ổn định của tuyến; ba là nhóm giải pháp quản trị nào cần được ưu tiên để chuyển lợi thế hạ tầng và mạng lưới thành cam kết mức dịch vụ có thể kiểm chứng đối với hãng tàu?

Mặc dù các nghiên cứu về năng lực cạnh tranh và lựa chọn cảng đã xác định nhiều yếu tố như vị trí, chi phí, hạ tầng, hiệu quả khai thác, chất lượng dịch vụ và kết nối hậu phương [1-4], phần lớn công trình vẫn xem xét quyết định lựa chọn cảng tại một thời điểm hoặc xếp hạng các tiêu chí. Tổng quan của Parola và cộng sự [7] khẳng định tính đa chiều của năng lực cạnh tranh cảng, nhưng mối liên hệ giữa các điều kiện năng lực với khả năng duy trì tuyến sau khi đưa vào khai thác chưa được làm rõ. Đặc biệt, thu hút tuyến và duy trì tuyến thường chưa được phân biệt, trong khi một cảng có thể thu hút tuyến mới nhờ ưu đãi ban đầu nhưng không bảo đảm quy mô hàng, tần suất và độ tin cậy để tuyến hoạt động ổn định. Tại Việt Nam, nghiên cứu gần đây đã đánh giá lựa chọn bến container từ góc nhìn hãng tàu bằng mô hình ra quyết định đa tiêu chí [8], song còn thiếu nghiên cứu tình huống sử dụng dữ liệu khai thác theo thời gian để xem xét đồng thời sản lượng, số chuyến, quy mô hàng trên chuyến và mức độ tập trung hãng/tuyến. Khoảng trống này đặc biệt đáng chú ý đối với cảng cửa ngõ nằm sâu trong sông và vận hành như một nút của mạng cảng, nơi kết nối sà lan và phối hợp hệ thống có thể quyết định tính bền vững của tuyến.

Trong nghiên cứu này, tác giả thực hiện đồng thời xây dựng khung đánh giá tích hợp bốn nhóm năng lực đối với một cảng cửa ngõ khu vực phía Nam TP.HCM; phân biệt rõ thu hút tuyến với duy trì tuyến trong phân tích kết quả khai thác; đề xuất hệ chỉ báo quản trị theo tuyến có thể áp dụng trong phối hợp kinh doanh và khai thác tại TCHP.

2. CƠ SỞ NGHIÊN CỨU VÀ KHUNG PHÂN TÍCH

2.1. Lựa chọn cảng và duy trì tuyến tàu

Các nghiên cứu lựa chọn cảng chỉ ra rằng nguồn hàng địa phương, vị trí, chi phí, khả năng sẵn có của cầu bến, hiệu quả terminal, kết nối hậu phương và mạng feeder là các yếu tố có ảnh hưởng lớn đến quyết định của hãng tàu [1, 2]. Ở góc độ chuỗi vận tải, thời gian, chi phí toàn hành trình, độ tin cậy và tính linh hoạt cần được xem xét đồng thời [3]. Do đó, ưu đãi giá chỉ tạo tác động bền vững khi gắn với nguồn hàng và mức dịch vụ có thể kiểm chứng.

Trong khi thu hút phản ánh khả năng đưa một tuyến hoặc một chuyến tàu vào cảng, duy trì phản ánh khả năng giữ lịch khai thác qua thời gian và tăng hiệu quả thương mại của tuyến. Nghiên cứu này sử dụng các chỉ báo kết quả gồm số tuyến/nhóm có hàng, số chuyến, sản lượng bình quân, tỷ lệ tuyến duy trì và mức độ tập trung sản lượng. Chỉ số HHI được tính bằng tổng bình phương thị phần sản lượng của từng hãng/tuyến; HHI thấp hơn cho thấy danh mục sản lượng phân tán hơn, nhưng không tự động đồng nghĩa với hiệu quả cao hơn.

2.2. Khung 4 nhóm năng lực

Khung phân tích gồm 4 nhóm: Điều kiện luồng tuyến và năng lực cầu, bến, bãi; hiệu suất, độ tin cậy và số hóa khai thác; nguồn hàng, dịch vụ giá trị gia tăng và năng lực container lạnh; kết nối đường thủy - đường bộ và khả năng phối hợp trong mạng Tân Cảng Sài Gòn. Kết quả khai thác là đầu ra của sự tương tác giữa 4 nhóm này, không phải của riêng một yếu tố.

Bảng 1. Nền tảng năng lực liên quan đến thu hút tuyến tàu tại TCHP

Nhóm	Hiện trạng chính	Ý nghĩa đối với hãng tàu
Luồng tuyến - cầu bến	420 m cầu tàu; tàu 50.000 DWT đầy tải, 70.000 DWT giảm tải; luồng Soài Rạp	Mở rộng dải tàu có thể khai thác tại khu vực TP.HCM
Bãi - hàng lạnh	Khoảng 17 ha bãi; 260 ổ cắm lạnh	Hỗ trợ hàng xuất khẩu lạnh và dịch vụ giá trị gia tăng
Kết nối thủy	Bến sà lan; kết nối Cát Lái/Cái Mép	Gom hàng, nối chuyến và giảm phụ thuộc đường bộ
Thiết bị - số hóa	Cẩu bờ, RTG; TOPX/TOPO, E-port, eDO	Rút ngắn giao dịch, nâng minh bạch và năng suất
Danh mục dịch vụ	Container, hàng tổng hợp, RORO, logistics	Đa dạng nguồn hàng và khả năng bán gói dịch vụ

Nguồn: Tổng hợp từ báo cáo năng lực TCHP [6].

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng số liệu thống kê sản lượng thông qua, gồm sản lượng TEU và số chuyến theo tháng, hãng tàu và tuyến dịch vụ. Chuỗi giá trị thống kê theo tháng của Cảng Tân Cảng Hiệp Phước. Tổng tháng được đối chiếu với tổng các dòng hãng/tuyến và tổng năm. Dữ liệu năng lực cảng được lấy từ báo cáo doanh nghiệp [6]. Các chỉ tiêu mô tả gồm sản lượng năm, tốc độ tăng, số hãng/tuyến có sản lượng, số chuyến, sản lượng bình quân mỗi chuyến, HHI và tỷ trọng 3 hãng/tuyến lớn nhất.

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo áp dụng phương pháp nghiên cứu tình huống kết hợp phân tích thống kê mô tả, so sánh theo thời gian và đối chiếu với khung năng lực cạnh tranh cảng. Năng lực thu hút tuyến được nhận diện thông qua quy mô sản lượng, số hãng/tuyến có hàng, số chuyến và mức độ đa dạng hóa danh mục. Năng lực duy trì tuyến được đánh giá gián tiếp thông qua sản lượng bình quân mỗi chuyến, tính liên tục của hoạt động hãng/tuyến, mức độ tập trung sản lượng và khả năng bảo đảm các điều kiện khai thác hỗ trợ. Chỉ số HHI được tính bằng tổng bình phương tỷ trọng sản lượng của từng dòng hãng/tuyến; tỷ trọng ba dòng lớn nhất được sử dụng bổ sung để nhận diện rủi ro phụ thuộc.

Các kết quả định lượng được đối chiếu với thông tin về cầu bến, bãi, thiết bị, năng lực container lạnh, số hóa và kết nối sà lan để hình thành đánh giá theo 4 nhóm năng lực. Đây là nghiên cứu mô tả, đánh giá, không suy diễn quan hệ nhân quả giữa một yếu tố riêng lẻ với quyết định lựa chọn cảng của hãng tàu. Do dữ liệu chưa có đầy đủ thời điểm mở/dừng từng tuyến và KPI mức dịch vụ, khái niệm duy trì tuyến được diễn giải thận trọng như năng lực thể hiện qua kết quả khai thác và các điều kiện hỗ trợ, không phải tỷ lệ sống còn tuyến đã được ước lượng trực tiếp.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Sản lượng, quy mô chuyến và mức độ tập trung

Bảng 2. Chỉ báo khai thác và cơ cấu tuyến

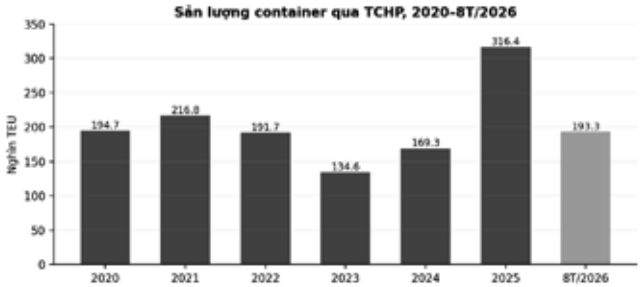
Năm	Tốc độ tăng trưởng sản lượng	Số hãng/ tuyến	Sản lượng bình quân (TEU/chuyến)	HHI	Top 3 (%)
2020	–	10	536	0,270	78,5
2021	11,3	11	697	0,179	65,8
2022	-11,6	14	605	0,128	52,2
2023	-29,8	14	561	0,133	52,5
2024	25,8	11	705	0,181	67,3
2025	86,9	13	729	0,136	52,3
8T/2026	-5,2*	12	713	0,141	56,9

** So với cùng kỳ 8 tháng năm 2025*

Nguồn: Tính toán từ dữ liệu doanh nghiệp.

Giai đoạn 2020 - 2024 có biến động mạnh và không hình thành xu thế tăng đều. Sau khi giảm xuống 134.586 TEU năm 2023, sản lượng phục hồi lên 169.271 TEU năm 2024. Bước thay đổi lớn xuất hiện năm 2025: Sản lượng đạt 316.364 TEU, tăng 86,9%; số chuyến tăng từ 240 lên 434, đồng thời TEU/chuyến tăng từ 705 lên 729. Như vậy, tăng trưởng năm 2025 đến từ cả mở rộng tần suất/chuyến và duy trì quy mô hàng trên chuyến, chứ không chỉ là hiệu ứng tăng số chuyến.

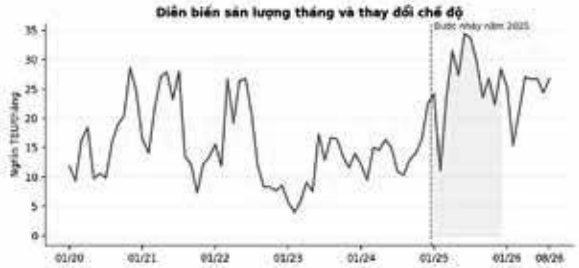
HHI giảm từ 0,181 năm 2024 xuống 0,136 năm 2025; tỷ trọng 3 hãng/tuyến lớn nhất giảm từ 67,3% xuống 52,3%. Điều này cho thấy tăng trưởng 2025 gắn với danh mục nguồn hàng/tuyến đa dạng hơn. Tuy nhiên, 8 tháng đầu năm 2026 đạt 193.342 TEU, thấp hơn 5,2% so với cùng kỳ 2025; TEU/chuyến giảm nhẹ còn 713 và tỷ trọng top 3 tăng lên 56,9%. Kết quả chưa cho thấy suy giảm nghiêm trọng, nhưng phát tín hiệu rằng thách thức chuyển từ thu hút nhanh sang duy trì đều và giảm phụ thuộc.



Hình 1. Sản lượng container qua TCHP theo năm

Nguồn: Tính toán từ dữ liệu doanh nghiệp. Năm 2026 gồm 8 tháng.

4.2. Biến động theo tháng và hàm ý đối với duy trì tuyến



Hình 2. Diễn biến sản lượng container theo tháng

Nguồn: Tính toán từ dữ liệu doanh nghiệp.

Sản lượng tháng dao động từ 3.958 TEU (tháng 02/2023) đến 34.444 TEU (tháng 6/2025), cho thấy nhu cầu khai thác tại cảng chịu ảnh hưởng mạnh của việc mở, dừng, điều chỉnh tần suất tuyến và khả năng tập kết nguồn hàng. Từ đầu năm 2025, mặt bằng sản lượng chuyển lên mức cao hơn rõ rệt, tuy nhiên diễn biến 8 tháng đầu năm 2026 cho thấy mức tăng đột biến chưa tự động chuyển thành quỹ đạo ổn định dài hạn.

Về phương diện quản trị tuyến, biến động theo tháng cần được phân rã theo hãng/tuyến, số chuyến và sản lượng bình quân mỗi chuyến. Một tuyến được coi là có triển vọng duy trì khi đồng thời bảo đảm tần suất thực hiện so với kế hoạch, quy mô hàng tối thiểu trên chuyến và mức dịch vụ ổn định trong các mốc 3, 6 và 12 tháng. Cách tiếp cận này giúp tách tăng trưởng do bổ sung chuyến ngắn hạn khỏi năng lực duy trì tuyến thực chất.

4.3. Đánh giá năng lực thu hút và duy trì tuyến tàu

Bảng 3. Đánh giá theo 4 nhóm năng lực

Nhóm năng lực	Bằng chứng thuận lợi	Khoảng trống/rủi ro
Luồng tuyến - cầu bến	420 m cầu tàu; tiếp nhận tàu đến 70.000 DWT giảm tải; vị trí trên luồng Soài Rạp	Khả năng thu hút phụ thuộc đồng thời độ ổn định luồng, cửa sổ cầu và năng suất thực tế
Hiệu suất - số hóa	TEU/chuyến 729 năm 2025; TOPX/TOPO, E-port, eDO	Chưa có chuỗi KPI công bố trong bộ dữ liệu về chờ cầu, năng suất cẩu, đúng cửa sổ
Nguồn hàng - GTGT	Sản lượng 2025 tăng 86,9%; 260 ổ cắm lạnh; dịch vụ đa dạng	Cần chứng minh tính ổn định theo hành lang hàng hóa và tỷ lệ duy trì tuyến 6 - 12 tháng
Kết nối mạng	Bến sà lan; liên kết Cát Lái/Cái Mép; hỗ trợ vận chuyển nội hệ thống	Cần lịch sà lan cố định, cut-off đồng bộ và đo tỷ lệ lỡ nối chuyến/chi phí toàn chuỗi

Nguồn: Tổng hợp của tác giả từ dữ liệu khai thác và báo cáo năng lực [6].

Thứ nhất, về năng lực vật chất, TCHP có nền tảng phù hợp để phục vụ nhóm tàu lớn hơn so với nhiều bến trong khu vực nội đô. Tuy nhiên, thông số thiết kế cần được chuyển hóa thành mức dịch vụ: Cửa sổ cầu bến, giới hạn tiếp nhận trong từng điều kiện luồng và thời gian giải phóng tàu. Hãng tàu ra quyết định dựa trên hiệu quả hành trình thực tế hơn là thông số hạ tầng đơn lẻ.

Thứ hai, dữ liệu 2025 cho thấy năng lực hấp thụ tăng trưởng: Số chuyến tăng 80,8% so với 2024 trong khi TEU/chuyến vẫn tăng 3,3%. Đây là bằng chứng tích cực về khả năng phục vụ đồng thời nhiều chuyến và duy trì quy mô hàng. Tuy nhiên, để biến kết quả này thành lợi thế thương mại có thể thuyết phục hãng tàu, TCHP cần bộ dữ liệu KPI theo tuyến về thời gian chờ cầu, năng suất cẩu, tỷ lệ đúng cửa sổ và thời gian container qua cổng.

Thứ ba, cơ cấu sản lượng đa dạng hơn năm 2025 là điều kiện thuận lợi cho duy trì tuyến. Lợi thế hàng lạnh và vị trí gần nguồn hàng phía Nam Thành phố với Đồng bằng sông Cửu Long nên được tổ chức thành gói hành lang hàng hóa, gồm container rỗng, PTI, ổ cắm lạnh, đóng hàng, thủ tục điện tử, sà lan và cam kết cut-off. Cách tiếp cận này trực tiếp giải quyết nhu cầu về nguồn hàng hai chiều và chi phí toàn chuỗi.

Thứ tư, giá trị khác biệt lớn nhất của TCHP là khả năng hoạt động như một nút trong hệ sinh thái Tân Cảng Sài Gòn. Kết nối sà lan với Cát Lái và Cái Mép giúp hãng tàu có thêm phương án phân tải và nối chuyến. Để lợi thế mạng trở nên bền vững, hỗ trợ ban đầu cần được thay bằng lịch sà lan ổn định, theo dõi container xuyên cảng, biểu giá trọn gói và cơ chế chịu trách nhiệm khi lỡ nối chuyến.

5. HÀM Ý QUẢN TRỊ

TCHP nên chuyển từ ưu đãi chung sang hợp đồng giá trị theo tuyến. Mỗi gói cần quy định rõ sản lượng mục tiêu, cam kết mức dịch vụ, thời hạn đánh giá và cơ chế điều chỉnh. Tuyến thử nghiệm được đánh giá sau 3, 6 và 12 tháng; hỗ trợ chỉ kéo dài khi tuyến đạt ngưỡng sản lượng bình quân mỗi chuyến, độ đều lịch và khả năng phát triển nguồn hàng đã thống nhất.

Về dữ liệu, cảng cần xây dựng bảng điều hành theo tuyến thay vì chỉ theo dõi tổng TEU. Bộ chỉ báo tối thiểu gồm số chuyến kế hoạch/thực tế, tỷ lệ hủy chuyến, TEU/chuyến, thời gian chờ cầu, năng suất cẩu, tỷ lệ đúng cửa sổ, thời gian sà lan, tỷ lệ lỡ nối chuyến và mức độ duy trì sau 3, 6 và 12 tháng. Dữ liệu cần được liên kết giữa bộ phận thương mại, khai thác và điều độ sà lan để nhận diện sớm tuyến có nguy cơ suy giảm, đồng thời làm căn cứ điều chỉnh cam kết dịch vụ và chính sách hỗ trợ.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy năng lực thu hút và duy trì tuyến tại TCHP phải được xem xét như kết quả tổng hợp của điều kiện luồng lạch và cầu bến, hiệu suất và độ tin cậy khai thác, luồng hàng, cùng kết nối hậu phương và mạng lưới cảng trong khu vực. Mức tăng 86,9% về sản lượng và 80,8% về số chuyến trong năm 2025, đi kèm sản lượng bình quân mỗi chuyến tăng 3,3% và HHI giảm, là bằng chứng tích cực về khả năng hấp thụ tuyến và đa dạng hóa nguồn hàng. Tuy nhiên, sản lượng 8 tháng đầu năm 2026 giảm so với cùng kỳ, TEU/chuyến giảm còn 713 và tỷ trọng 3 khách hàng lớn nhất tăng lên 56,9%. Kết quả này cho thấy lợi thế thu hút ban đầu cần được chuyển hóa thành năng lực duy trì bằng cam kết cửa sổ cầu bến và thời gian giải phóng tàu, phát triển nguồn hàng hai chiều theo hành lang, lịch sà lan ổn định trong hệ thống và cơ chế hỗ trợ có điều kiện gắn với KPI theo tuyến.

Hạn chế của nghiên cứu là dữ liệu chưa bao gồm chi phí toàn chuỗi, thời gian chờ, năng suất cầu bến, độ đúng lịch, booking, đặc điểm tàu, thời điểm mở, dừng tuyến và đánh giá trực tiếp của hãng tàu. Trong nghiên cứu tiếp theo, tác giả dự định kết hợp dữ liệu tuyến theo tháng với phỏng vấn hoặc khảo sát hãng tàu, từ đó lượng hóa trọng số các yếu tố lựa chọn cảng và xác định trực tiếp tỷ lệ duy trì tuyến theo thời gian.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tongzon, J.L. Port choice and freight forwarders. Transportation Research Part E, 45(1), 186-195, 2009, https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.004.

[2] Kaliszewski, A., Kozłowski, A., Dąbrowski, J. & Klimek, H. Key factors of container port competitiveness: A global shipping lines perspective. Marine Policy, 117, 103896, 2020, https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103896.

[3] Rezaei, J., van Wulfften Palthe, L., Tavasszy, L., Wiegmans, B. & van der Laan, F. Port performance measurement in the context of port choice: an MCDA approach. Management Decision, 57(2), 396-417, 2019, https://doi.org/10.1108/MD-04-2018-0482.

[4] Notteboom, T., Pallis, A. & Rodrigue, J.-P. Port Economics, Management and Policy. Routledge, New York, 2022.

[5] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1579/QĐ-TTg ngày 22/9/2021 phê duyệt Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống cảng biển Việt Nam thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2021.

[6] Công ty Cổ phần Cảng Tân Cảng Hiệp Phước. Báo cáo năng lực cảng và dữ liệu sản lượng hàng hóa thông qua cảng 2020 - 2026, 2026.

[7] Parola, F., Risitano, M., Ferretti, M. & Panetti, E. The drivers of port competitiveness: A critical review. Transport Reviews, 37(1), 116-138, 2017, https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1231232.

[8] Pham, T.Y., Truong, N.C., Nguyen, P.H. & Kim, H.-S. The fuzzy MCDM for container terminal choice in Vietnam from shipping lines' perspective based on cumulative prospect theory. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 40(3), 147-156, 2024, https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2024.06.003.

■ Ngày nộp bài: 11/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 17/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Truy vết quyết định trong biến động chi phí dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước

Tracing decisions in cost variations of state-funded construction investment projects

> TS HOÀNG NGỌC SƠN
Thanh tra Chính phủ
Email: hnson.btc@gmail.com

TÓM TẮT

Biến động chi phí trong dự án đầu tư xây dựng thường được lý giải bởi các yếu tố kỹ thuật, thị trường, hợp đồng và quản trị. Tuy nhiên, chênh lệch chi phí ở cuối quá trình không tự cho biết quyết định nào tạo ra kết quả, thông tin nào tồn tại tại thời điểm ra quyết định và bằng chứng cho phép xem xét trách nhiệm đến đâu. Nghiên cứu sử dụng phân tích tài liệu có cấu trúc và tái dựng chuỗi sự kiện từ hai nguồn thanh tra công khai về dự án xây dựng sử dụng vốn nhà nước. Tên dự án, đơn vị, địa phương, số hiệu văn bản và giá trị tuyệt đối được ẩn danh; trình tự sự kiện, cơ chế truyền dẫn và bản chất phát hiện được giữ nguyên. Bài báo đề xuất Khung truy vết Quyết định - Chi phí - Trách nhiệm (DCATF), liên kết sự kiện quyết định, tập thông tin, cơ chế truyền dẫn chi phí và giới hạn bằng chứng. Hai chuỗi về điều chỉnh phương án móng và xác định đơn giá vật liệu cho thấy các tác động chi phí tương tự có thể hình thành qua cơ chế khác nhau, vì vậy không thể suy trực tiếp từ kết quả tài chính sang nguyên nhân hay trách nhiệm. DCATF được định vị như một khung quản trị bằng chứng hậu kiểm, hỗ trợ tăng khả năng truy vết và kỷ luật lập luận trong quản lý chi phí dự án sử dụng vốn nhà nước.

Từ khóa: Biến động chi phí; dự án đầu tư xây dựng; vốn nhà nước; truy vết quyết định; bằng chứng thanh tra; trách nhiệm giải trình.

ABSTRACT

Cost variations in construction investment projects are commonly explained by technical, market, contractual and managerial factors. Yet a cost difference does not by itself reveal which decision generated the outcome, what information was available at the time, or how far the evidence permits accountability assessment. This study applies structured document analysis and event reconstruction using two publicly available inspection sources concerning state-funded construction projects. Cases are coded, while project names, organizations, locations, document identifiers, and absolute monetary values are omitted to preserve anonymity; event order, transmission mechanisms and the nature of findings are retained. The study proposes a Decision-Cost-Accountability Traceability Framework (DCATF) linking decision events, information sets, cost-transmission mechanisms and evidentiary limits. Two empirical chains involving foundation-design adjustment and construction-material price determination show that similar cost effects may arise through different mechanisms. DCATF is positioned as an ex-post evidence-governance framework that strengthens traceability and analytical discipline in state-funded construction investment projects.

Keywords: Cost variation; construction investment project; state funds; decision traceability; inspection evidence; accountability.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước hình thành qua nhiều quyết định về khảo sát, thiết kế, tổng mức đầu tư, dự toán, hợp đồng, thi công, nghiệm thu và thanh toán. Do đó, một biến động chi phí ở cuối chuỗi có thể bắt nguồn từ quyết định sớm hơn; số tiền cuối cùng chưa đủ để nhận diện cơ chế hình thành.

Nghiên cứu quốc tế giải thích vượt chi phí qua dự tính thấp chi phí và thời gian hoặc trình bày sai lệch có chủ đích (strategic misrepresentation) [1], sai sót thiết kế và yếu tố hệ thống [2], vai trò của nhiều chủ thể [3] hoặc tác động của lệnh thay đổi tới thời gian và chi phí [4]. Điểm chung là kết quả tài chính không tự giải thích cơ chế hình thành.

Nguyen và cộng sự nghiên cứu đường truyền ảnh hưởng của các bên liên quan trong dự án xây dựng tại Việt Nam [5]; Beach và Pedersen tập trung vào cơ chế nối nguyên nhân với kết quả [6]. Bài báo chỉ vận dụng logic truy vết để đi từ tác động chi phí đã được xác nhận về sự kiện, tập thông tin và giới hạn bằng chứng trước khi xem xét trách nhiệm.

Nghiên cứu đặt DCATF cạnh AACE [7], SCL Delay and Disruption Protocol [8], chuẩn bằng chứng kiểm toán [9, 10], kế

toán điều tra (forensic accounting) [11] và nghiên cứu quản lý chi phí trong nước [12, 13]. Ba câu hỏi được đặt ra: Biến động chi phí hình thành qua sự kiện nào; các trạng thái bằng chứng được phân biệt ra sao và khi nào có thể chuyển từ liên hệ quyết định - chi phí sang xem xét trách nhiệm.

Trong nghiên cứu này, "biến động chi phí" là sự thay đổi hoặc chênh lệch của giá trị chi phí tại các khâu tổng mức đầu tư, dự toán, hợp đồng, thực hiện hoặc thanh toán, khi có thể liên hệ với một hay nhiều sự kiện ra quyết định. Khái niệm bao gồm biến động gắn với thiết kế, khối lượng, định mức, đơn giá, phạm vi hợp đồng và yếu tố bên ngoài nếu có bằng chứng; không đồng nhất với vượt chi phí, vi phạm, thiệt hại hay lãng phí.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ ĐỊNH VỊ KHUNG

2.1. Từ yếu tố tới cơ chế

Nghiên cứu vượt chi phí chủ yếu nhận diện yếu tố hoặc mô hình hành vi [1-4], nhưng chưa chỉ rõ quyết định cụ thể nào làm thay đổi thiết kế, khối lượng, đơn giá hoặc nghĩa vụ hợp đồng. Các giả thuyết về chủ ý không được áp dụng cho trường hợp Việt Nam khi thiếu bằng chứng theo thời điểm.

2.2. Logic truy vết cơ chế

Truy vết quá trình (process tracing) cung cấp logic về trình tự thời gian, cơ chế và bằng chứng [6]. DCATF chỉ vận dụng logic này để tái dựng hồ sơ hậu kiểm, bắt đầu từ tác động chi phí rồi truy ngược về quyết định và tập thông tin; khung không đề xuất phép thử nhân quả mới.

2.3. Phân tích pháp y tiến độ, thay đổi và hậu kiểm công vụ

AACE 29R-03 và SCL Delay and Disruption Protocol coi trọng trình tự sự kiện, hồ sơ đương thời và quan hệ nguyên nhân - hệ quả trong phân tích tiến độ, hợp đồng [7, 8]; nghiên cứu lệnh thay đổi cũng lượng hóa tác động thời gian và chi phí [4]. DCATF chuyển trọng tâm sang hậu kiểm vốn nhà nước và ranh giới bằng chứng trước khi xem xét trách nhiệm công vụ.

2.4. Phân tích nguyên nhân gốc và bằng chứng

IIA đặt phát hiện trong quan hệ tiêu chí - hiện trạng - nguyên nhân - hệ quả [9]; INTOSAI yêu cầu bằng chứng đầy đủ, thích hợp và xem xét giải thích cạnh tranh [10]; kế toán điều tra nhấn mạnh khả năng truy nguyên tài liệu [11]. Các nghiên cứu trong nước cũng cho thấy vai trò của dữ liệu và công cụ kiểm soát chi phí [12, 13].

2.5. Đóng góp của khung

DCATF bổ sung hai điểm: Quy tắc dừng khi nguồn không cho phép xác định tập thông tin tại thời điểm quyết định và mã hóa cấp sự kiện để kiểm tra ngược phát hiện hậu kiểm theo quyết định, cơ chế và nguồn.

Bảng 1. Định vị DCATF so với các tiếp cận gần nhất

Tiếp cận	Trọng tâm	Điểm gần DCATF	DCATF bổ sung
Vượt chi phí/lệnh thay đổi	Yếu tố, thay đổi, tác động thời gian/chi phí	Giải thích nguyên nhân hoặc tác động	Sự kiện quyết định, tập thông tin, ranh giới trách nhiệm
AACE/SCL	Sự kiện tiến độ/hợp đồng	Trình tự, hồ sơ, nguyên nhân - hệ quả	Hậu kiểm công vụ và cổng trách nhiệm
IIA/INTOSAI	Nguyên nhân và bằng chứng	Tiêu chí - hiện trạng - nguyên nhân - hệ quả	Mã hóa sự kiện, quy tắc dừng theo tập thông tin
DCATF	Sự kiện quyết định trong hậu kiểm	Kế thừa các nguyên tắc trên	Truy vết + cổng tập thông tin + khoảng trống bằng chứng

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Thiết kế và phạm vi rà soát

Nghiên cứu sử dụng phân tích tài liệu có cấu trúc kết hợp tái dựng chuỗi sự kiện. Một liên hệ chỉ được giữ khi đồng thời có trình tự thời gian phù hợp, cơ chế truyền dẫn khả dĩ và tài liệu hỗ trợ. Tổng quan là rà soát có mục tiêu, tập trung vào vượt chi phí, thay đổi, truy vết cơ chế và chuẩn bằng chứng.

3.2. Nguồn thực nghiệm và lựa chọn trường hợp

Nguồn thực nghiệm gồm hai tài liệu thanh tra công khai của cơ quan có thẩm quyền về dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước, mã hóa là Nguồn A và Nguồn B [14, 15]. Trường hợp được chọn có chủ đích khi đáp ứng 4 điều kiện: Dự án sử dụng vốn nhà nước; có nguồn chính thức; có tác động chi phí được lượng hóa trong hồ sơ gốc và có tối thiểu ba sự kiện theo thời gian. Trong bản công bố, thông tin nhận diện và giá trị tuyệt đối được ẩn danh; hồ sơ đầy đủ được tác giả lưu để phục vụ kiểm chứng khi cần thiết. Mẫu không đại diện thống kê.

3.3. Vị trí tác giả và kỷ luật nguồn

Tác giả công tác trong lĩnh vực thanh tra nhà nước có liên quan đến nhóm tài liệu được sử dụng. Nghiên cứu chỉ dùng tài liệu đã công khai hoặc giải mật hợp pháp, không dùng hồ sơ nội bộ để lấp mắt xích thiếu. Việc ẩn danh không làm thay đổi trình tự sự kiện, quan hệ bao hàm, cơ chế truyền dẫn, tiêu chí pháp lý hay mức bằng chứng. Nội dung thiếu căn cứ truy nguyên được loại hoặc hạ mức suy luận; không suy ngược động cơ hay nhận thức cá nhân từ kết quả hậu kiểm.

3.4. Ma trận bằng chứng và sổ mã hóa

Ma trận tách hai chiều độc lập. Loại sự kiện gồm M - mốc tham chiếu, Q - quyết định/thay đổi, T - thông tin/thủ tục và F - phát hiện hậu kiểm. Trạng thái bằng chứng gồm N - trung tính, A - ngoại sinh, B - yếu kém kỹ thuật/quản trị, C - không tuân thủ đã được nguồn có thẩm

quyền xác định và D - khoảng trống cần xác minh. Mã D không tự hàm ý nghi vấn; T/D được phép khi thủ tục trung tính nhưng thiếu bằng chứng để đi tiếp tới trách nhiệm. Mẫu không có mã A vì nguồn chưa đủ chứng minh tính ngoại sinh.

Bảng 2. Sổ mã hóa: Loại sự kiện và trạng thái bằng chứng

Nhóm	Mã	Ý nghĩa	Quy tắc
Loại	M	Mốc tham chiếu	Không hàm ý vấn đề
Loại	Q	Quyết định/thay đổi	Điểm nút trong trình tự
Loại	T	Thông tin/thủ tục	Bản thân trung tính
Loại	F	Phát hiện hậu kiểm	Kết quả do nguồn xác định
Trạng thái	N	Trung tính	Không hàm ý bất thường
Trạng thái	A	Ngoại sinh	Có bằng chứng yếu tố ngoài và tác động
Trạng thái	B	Yếu kém kỹ thuật/quản trị	Chưa kết luận không tuân thủ
Trạng thái	C	Không tuân thủ	Nguồn có thẩm quyền xác định
Trạng thái	D	Khoảng trống cần xác minh	Chưa đủ bằng chứng; có thể T/D

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Trường hợp A - chuỗi tổng mức đầu tư: Thông tin xuất hiện trước quyết định

Ở một nhóm dự án công trình y tế, trước thời điểm phê duyệt đã xuất hiện văn bản thẩm tra chuyên môn yêu cầu kiểm tra hoặc điều chỉnh một số nội dung về khối lượng, nhân công, máy, thiết bị và thành phần chi phí [14]. Sau bước thẩm định, dự án được phê duyệt; hậu kiểm xác định một số nội dung chi phí trong tổng mức đầu tư chưa chính xác với giá trị đáng kể. Chuỗi xác nhận tập thông tin chuyên môn đã tồn tại trước quyết định. Tuy nhiên, nguồn chưa đủ để đối chiếu từng ý kiến thẩm tra với khoản chênh lệch tương ứng, cũng chưa cho biết người phê duyệt đã tiếp nhận và xử lý thông tin ra sao, vì vậy không thể suy luận về nhận thức, động cơ hoặc trách nhiệm cá nhân.

4.2. Trường hợp A - chuỗi điều chỉnh phương án móng: Từ thay đổi thiết kế tới thời gian và chi phí

Tại cùng nhóm dự án, sau mốc ký hợp đồng xây lắp, nhà thầu đề nghị điều chỉnh phương án xử lý nền móng [14]. Tiếp đó là quá trình trình thẩm tra và phê duyệt điều chỉnh thiết kế cơ sở. Nguồn hậu kiểm ghi nhận thời gian thi công phần móng kéo dài và xác định chênh lệch chi phí liên quan đến việc điều chỉnh phương án. Bài báo giữ nguyên bản chất phát hiện nhưng không chuyển khái niệm chi phí phát sinh thành "thiệt hại". Dữ liệu công khai cũng chưa đủ để quy toàn bộ thời gian kéo dài cho một nguyên nhân duy nhất.

4.3. Trường hợp B - chuỗi dữ liệu vật liệu → đơn giá → dự toán → chênh lệch

Đối với một dự án hạ tầng giao thông, tư vấn thiết kế sử dụng dữ liệu khảo sát từ một nhóm mỏ vật liệu và áp dụng phương pháp bình quân gia quyền trữ lư ợng để xác định đơn giá vật liệu đến công trình. Nguồn hậu kiểm xác định phương pháp này không phù hợp với quy định được viện dẫn [15]. Sự kiện phương pháp vì vậy được mã C - không tuân thủ đã được nguồn có thẩm quyền xác định.

Trong giai đoạn lập và phê duyệt dự toán, chủ đầu tư trình hồ sơ, cơ quan chuyên môn thực hiện thẩm định và cấp có thẩm quyền phê duyệt [15]. Hậu kiểm xác định chênh lệch đáng kể về giá vật liệu tại một số gói thầu. Cơ chế được nguồn hỗ trợ là: Dữ liệu/phương pháp xác định đơn giá → đơn giá vật liệu → dự toán → chênh lệch hậu kiểm. Bản công bố không nêu giá trị tuyệt đối nhưng giữ nguyên quan hệ thứ tự và cơ chế truyền dẫn.

Tại khâu thẩm định, nguồn viện dẫn quy định pháp luật về tính đầy đủ, hợp lý của hồ sơ, phương pháp xác định dự toán, định mức, giá và các căn cứ liên quan [15]. Đây là tiêu chí ở cấp chức năng, không chứng minh từng cá nhân đã nhận và xử lý đầy đủ toàn bộ dữ liệu đầu vào. Vì nguồn công khai chưa cho biết tập thông tin cụ thể của từng chủ thể, sự kiện được giữ ở T/D: Thủ tục trung tính nhưng có khoảng trống bằng chứng chặn suy luận trách nhiệm cá nhân.

4.4. Quan hệ bao hàm của các nhóm giá trị: Một tổng tiền không phải một cơ chế

Nguồn B cho thấy một giá trị tổng hợp phải điều chỉnh/giảm trừ được cấu thành từ nhiều hợp phần có cơ chế khác nhau, trong đó có chênh lệch giá vật liệu, giảm giá trị hợp đồng do hạng mục không thực hiện hoặc thay đổi theo thực tế và chênh lệch liên quan việc áp dụng mã định mức [15]. Các hợp phần này nằm trong nhóm tổng hợp và không được cộng thêm một lần nữa. Hai hợp phần chưa có đủ chuỗi sự kiện đứng trước chỉ được dùng để minh họa quan hệ bao hàm, không được sử dụng như chuỗi nhân quả độc lập.

Nguồn còn ghi nhận các nhóm xử lý khác: Định mức mới/điều chỉnh chưa thẩm định, chi phí tạm tính thiếu cơ sở pháp lý và vật liệu chuyên biệt cần rà soát [15]. Những nhóm này nằm ngoài nhóm tổng hợp. Phân loại theo quan hệ bao hàm ngăn cộng trùng và cho thấy số tiền không thay thế được phân tích phạm vi, cơ chế và sự kiện.

Bảng 3. Quan hệ bao hàm của các nhóm giá trị sau khi ẩn danh

Nhóm giá trị	Phạm vi mã hóa	Bản chất theo nguồn	Quan hệ bao hàm
G1	Phạm vi nhiều dự án	Nhóm tổng hợp phải giảm trừ/điều chỉnh dự toán và giá trị hợp đồng	Số tổng; chứa các hợp phần G1.1-G1.3
G1.1	Trường hợp B	Chênh lệch giá vật liệu	Thuộc G1; không cộng thêm
G1.2	Trường hợp B	Giảm giá trị hợp đồng do hạng mục không thực hiện/thay đổi	Thuộc G1; chỉ dùng như phát hiện số liệu
G1.3	Một trường hợp hạ tầng khác	Chênh lệch liên quan mã định mức vận chuyển	Thuộc G1; chỉ dùng như phát hiện số liệu
G2	Một trường hợp hạ tầng	Định mức mới/điều chỉnh chưa được thẩm định	Nhóm xử lý khác; ngoài G1
G3	Một trường hợp hạ tầng	Chi phí tạm tính chưa đủ cơ sở pháp lý	Nhóm xử lý khác; ngoài G1
G4	Một trường hợp hạ tầng	Rà soát đơn giá, khối lượng vật liệu công trình chuyên biệt	Nhóm xử lý khác; ngoài G1

4.5. Ma trận bằng chứng rút gọn

Bảng 4 chỉ giữ các sự kiện trực tiếp phục vụ ba chuỗi phân tích. Thông tin nhận diện, giá trị tuyệt đối và số hiệu văn bản được mã hóa trong bản công bố; các phát hiện chưa có chuỗi sự kiện đủ mạnh được giữ ở Bảng 3 thay vì ép thành quan hệ nhân quả.

Bảng 4. Ma trận bằng chứng rút gọn các sự kiện cốt lõi

ID	Loại/Trạng thái	Sự kiện	Tác động	Nguồn tham chiếu
A-TM01	T/N	Thẩm tra chuyên môn trước phê duyệt	Tập thông tin; chưa lượng hóa trong bản công bố	Nguồn A, phần lập/thẩm định TMĐT
A-TM02	F/B	Một số nội dung TMĐT chưa chính xác	Chênh lệch đáng kể; ẩn giá trị tuyệt đối	Nguồn A, phần kết luận và phụ lục chi phí
A-M01	Q/N	Đề nghị điều chỉnh phương án móng	Điểm nút thay đổi	Nguồn A, phần điều chỉnh thiết kế cơ sở
A-M02	F/B	Chênh chi phí điều chỉnh phương án móng	Phát sinh chi phí do điều chỉnh; ẩn giá trị tuyệt đối	Nguồn A, phần lãng phí và phụ lục kỹ thuật
B-VL01	Q/C	TVTK dùng dữ liệu mỏ và phương pháp bình quân gia quyền	Điểm nút phương pháp	Nguồn B, phần xác định đơn giá vật liệu
B-VL02	T/D	Thẩm định dự toán	Khoảng trống về tập thông tin cá nhân	Nguồn B, phần thẩm định dự toán
B-VL03	F/C	Xác định lại chênh lệch giá vật liệu	Chênh lệch đáng kể; thuộc nhóm tổng hợp G1	Nguồn B, phần xử lý kinh tế

5. KHUNG TRUY VẾT QUYẾT ĐỊNH - CHI PHÍ - TRÁCH NHIỆM

Ba tầng của DCATF là ba mức suy luận kế tiếp, không phải ba bước quy trách nhiệm. Tầng 1 kế thừa logic tái dựng sự kiện của truy vết quá trình và nghiên cứu thay đổi [4], [6-8]. Tầng 2 vận dụng yêu cầu về trình tự, cơ chế và bằng chứng trong phân tích pháp y và kiểm toán [7-10]. Tầng 3 kết hợp logic tiêu chí - hiện trạng - nguyên nhân - hệ quả với yêu cầu xác định tập thông tin tại thời điểm ra quyết định [9-11]. Đóng góp của DCATF nằm ở việc tổ chức ba mức này thành một chuỗi có quy tắc dừng.

5.1. Tầng 1 - truy ngược quyết định - chi phí

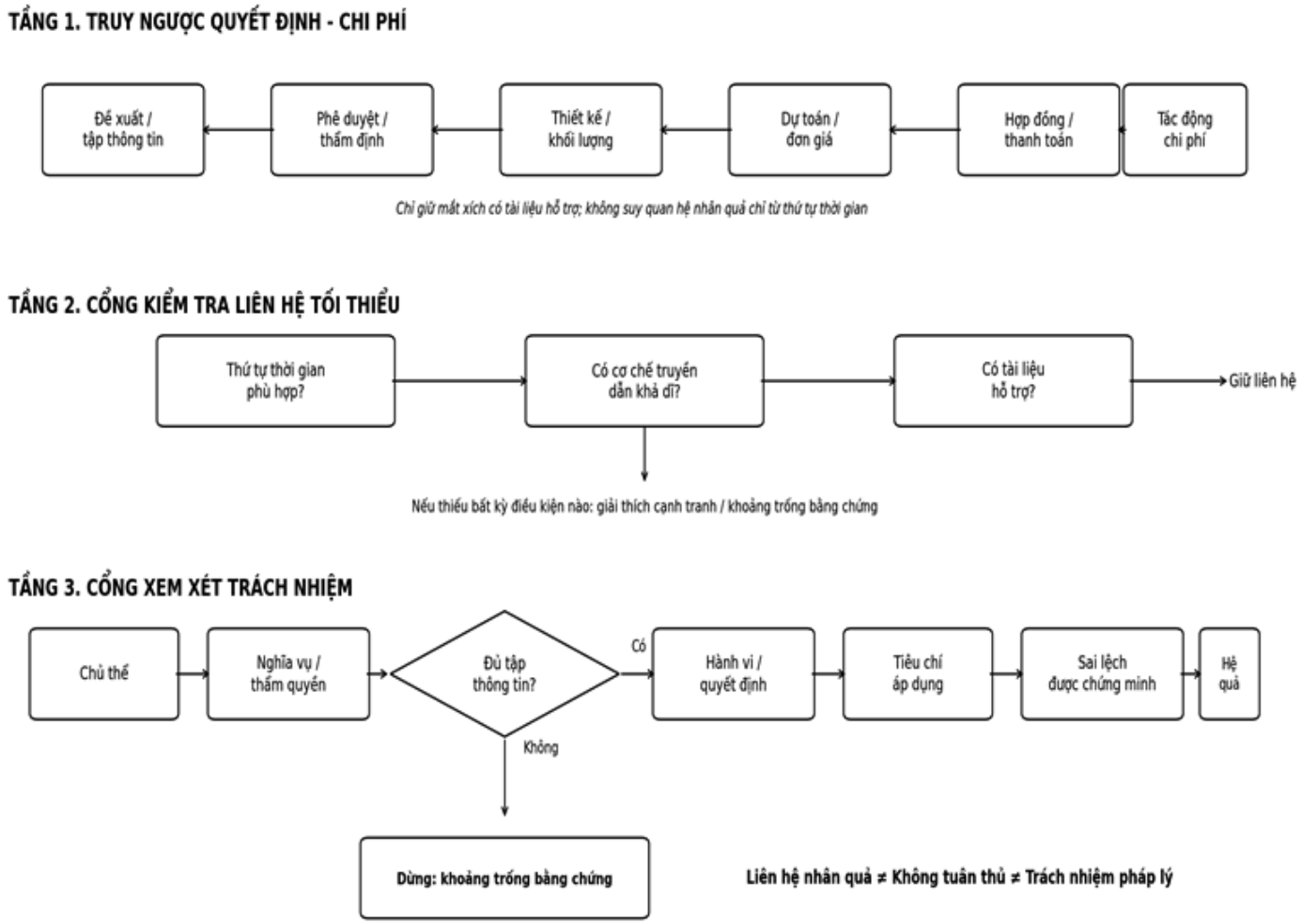
Điểm xuất phát là tác động chi phí đã được nguồn xác nhận, từ đó truy ngược qua hợp đồng/thanh toán, dự toán/đơn giá, thiết kế/khối lượng, phê duyệt/thẩm định, đề xuất và tập thông tin. Chỉ đường truyền được hồ sơ hỗ trợ mới được giữ.

5.2. Tầng 2 - cổng kiểm tra liên hệ tối thiểu

Một mắt xích chỉ được giữ khi đồng thời có trình tự thời gian phù hợp, cơ chế truyền dẫn khả dĩ và tài liệu hỗ trợ. Nếu thiếu một điều kiện, đầu ra là giải thích cạnh tranh hoặc khoảng trống bằng chứng, không phải kết luận nhân quả. Đây là quy tắc sàng lọc tối thiểu, không phải phép thử mới của truy vết quá trình.

5.3. Tầng 3 - cổng xem xét trách nhiệm

Bảy thành tố của cổng xem xét trách nhiệm được tổ chức như một chuỗi điều kiện kiểm soát suy luận, không phải 7 tiêu chí pháp lý độc lập: Chủ thể → Nghĩa vụ/thẩm quyền → Tập thông tin → Hành vi/quyết định → Tiêu chí áp dụng → Sai lệch được chứng minh → Hệ quả. Cấu trúc này nhằm tránh bước nhảy trực tiếp từ kết quả hậu kiểm sang trách nhiệm. Với chuỗi đơn giá vật liệu, nguồn cho phép xác định chủ thể tư vấn, dữ liệu đầu vào, phương pháp xác định giá, tiêu chí pháp lý và chênh lệch chi phí đã được hậu kiểm xác nhận. Khi chuyển sang từng chủ thể thẩm định, tập thông tin chưa đủ rõ nên chuỗi phải dừng. Vì vậy, liên hệ nhân quả, không tuân thủ và trách nhiệm pháp lý là ba mức kết luận khác nhau.



Hình 1. Khung truy vết Quyết định - Chi phí - Trách nhiệm (DCATF) ba tầng

6. THẢO LUẬN

6.1. Giá trị gia tăng của DCATF

AACE/SCL đã có kỹ thuật truy sự kiện tới thời gian và giá trị [7, 8]; IIA/INTOSAI yêu cầu phân tích nguyên nhân - hệ quả và bằng chứng [9, 10]. DCATF không phát hiện lại kết luận thanh tra, mà bổ sung giao thức mã hóa cấp sự kiện và quy tắc dừng. Chuỗi điều chỉnh phương án móng vẫn có giải thích cạnh tranh về thời gian; chuỗi đơn giá vật liệu rõ ở cấp phương pháp nhưng chưa đủ để quy trách nhiệm cá nhân ở khâu thẩm định.

6.2. DCATF không trùng KRI hoặc PCCFM

KRI của tác giả tập trung câu hỏi nội dung nào nên ưu tiên kiểm tra [16], còn PCCFM chuyển phát hiện hậu kiểm thành phản hồi phòng ngừa [17]. DCATF xử lý câu hỏi ở giữa: Tác động chi phí hình thành qua chuỗi quyết định nào và bằng chứng cho phép đi đến đâu. Vì vậy, DCATF không phải biến thể của điểm số rủi ro.

6.3. Hàm ý quản trị và hướng kiểm định

Ở góc độ quản lý nhà nước, giá trị hậu kiểm không nên dừng ở con số cần xử lý. Hồ sơ thẩm định vật liệu chủ yếu cần thể hiện phương pháp xác định đơn giá, dữ liệu đầu vào và căn cứ pháp lý; thay đổi thiết kế lớn cần liên kết yêu cầu thay đổi, căn cứ kỹ thuật, tiến độ và chi phí trong cùng dấu vết sự kiện. Ma trận bằng chứng có thể được thí điểm để kiểm tra tính đầy đủ của lập luận nguyên nhân - trách nhiệm; hiệu quả thực tế cần kiểm định trên trường hợp mới.

7. GIỚI HẠN NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu có các giới hạn chính: Nguồn là tài liệu thanh tra đã tổng hợp, không phải toàn bộ hồ sơ gốc; một nguồn chỉ sử dụng phần đã giải mật, công khai; việc ẩn danh làm giảm khả năng kiểm chứng trực tiếp của độc giả; ma trận do một tác giả mã hóa và mẫu chọn có chủ đích, không đại diện thống kê. DCATF mới được kiểm tra trên số trường hợp hạn chế. Nghiên cứu tiếp theo nên sử dụng nhiều người mã hóa và tham vấn chuyên gia độc lập để đánh giá độ rõ, khả năng tái lập và giá trị ứng dụng của khung.

8. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu cho thấy tác động chi phí không tự phản ánh đầy đủ cơ chế hình thành và trách nhiệm. Những khoản tiền cùng xuất hiện trong một kết luận có thể khác nhau về bản chất; một giá trị tổng hợp cũng có thể gồm nhiều hợp phần và dễ bị cộng trùng nếu tách khỏi phạm vi, cơ chế và quan hệ nguồn. Vì vậy, đơn vị phân tích phù hợp không chỉ là giá trị tài chính, mà là sự kiện quyết định gắn với cơ chế truyền dẫn và bằng chứng hỗ trợ.

DCATF được đề xuất như một khung quản trị bằng chứng hậu kiểm gồm ba tầng: Truy ngược từ tác động chi phí về quyết định; kiểm tra điều kiện tối thiểu của mối liên hệ và xác định giới hạn bằng chứng trước khi xem xét trách nhiệm. Quy tắc cốt lõi là dừng chuỗi ở khoảng trống bằng chứng khi chưa xác định được tập thông tin tại thời điểm quyết định hoặc tiêu chí áp dụng, thay vì tiếp tục bằng suy đoán.

Bài báo đề xuất ba hướng áp dụng: Chuẩn hóa dấu vết sự kiện đối với thay đổi thiết kế, khối lượng, định mức, đơn giá và hợp đồng; tăng khả năng truy nguyên phương pháp xác định đơn giá vật liệu chủ yếu và căn cứ pháp lý trong hồ sơ thẩm định; thí điểm ma trận bằng chứng đối với phát hiện chi phí trọng yếu. Cách tiếp cận này hướng hậu kiểm từ xử lý kết quả riêng lẻ sang nhận diện điểm kiểm soát cần củng cố và phòng ngừa tái diễn trong các dự án tương đồng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] B. Flyvbjerg, M. Garbuio and D. Lovallo. Delusion and deception in large infrastructure projects: Two models for explaining and preventing executive disaster. California Management Review, vol. 51, no. 2, pp. 170-194, 2009, doi: 10.2307/41166485.

[2] P. E. D. Love, D. J. Edwards and Z. Irani. Moving beyond optimism bias and strategic misrepresentation: An explanation for social infrastructure project cost overruns. IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 59, no. 4, pp. 560-571, 2012, doi: 10.1109/TEM.2011.2163628.

[3] H. Doloi. Cost overruns and failure in project management: Understanding the roles of key stakeholders in construction projects. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 139, no. 3, pp. 267-279, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000621.

[4] A. A. Oladapo. A quantitative assessment of the cost and time impact of variation orders on construction projects. Journal of Engineering Design and Technology, vol. 5, no. 1, pp. 35-48, 2007, doi: 10.1108/17260530710746597.

[5] T. H. D. Nguyen, N. Chileshe, R. Rameezdeen and A. Wood. Stakeholder influence pathways in construction projects: Multicase study. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 145, no. 9, Art. 05019011, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001680.

[6] D. Beach and R. B. Pedersen. Process-Tracing Methods: Foundations and Guidelines. 2nd ed. Ann Arbor, MI, USA: University of Michigan Press, 2019, doi: 10.3998/mpub.10072208.

[7] AACE International. Recommended Practice No. 29R-03: Forensic Schedule Analysis, rev. Apr. 25, 2011. Internet: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_29r-03.pdf (accessed: Sep. 1, 2026).

[8] Society of Construction Law. Delay and Disruption Protocol. 2nd ed., Feb. 2017. Internet: https://www.scl.org.uk/index.php/resources/delay-disruption-protocol (accessed: Sep. 1, 2026).

[9] The Institute of Internal Auditors. Global Internal Audit Standards. Lake Mary, FL, USA, 2024. Internet: https://www.theiia.org/en/standards (accessed: Sep. 1, 2026).

[10] INTOSAI. GUID 3920: The Performance Auditing Process, 2019. Internet: https://www.issai.org/pronouncements/guid-3920-the-performance-auditing-process/ (accessed: Sep. 1, 2026).

[11] F. R. Miller and D. L. Marston. Building a Case: Gathering and Documenting Evidence, in A Guide to Forensic Accounting Investigation, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012, pp. 175-189, doi: 10.1002/9781119200048.ch10.

[12] B. H. Minh. Các yếu tố tác động đến quản lý nhà nước về chi phí đầu tư xây dựng. Tạp chí Xây dựng, số 03, 2024. Internet: https://tapchixaydung.vn/cac-yeu-to-tac-dong-den-quan-ly-nha-nuoc-ve-chi-phi-dau-tu-xay-dung-20201224000022775.html (truy cập: 01/9/2026.

[13] N. L. Hương and N. Q. Toản. Quản lý rủi ro và chi phí dự phòng trong các dự án đầu tư xây dựng: Thực tiễn Việt Nam và khuyến nghị từ Tiêu chuẩn AACE. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, tập 16, số 03, tr. 164-172, 2026, doi: 10.54772/jomc.03.2026.1293.

[14] Cơ quan Thanh tra nhà nước. Tài liệu thanh tra công khai về một nhóm dự án đầu tư xây dựng sử dụng vốn nhà nước. Nguồn A, 2025. Thông tin nhận diện và giá trị tuyệt đối được ẩn danh trong bản công bố.

[15] Cơ quan Thanh tra nhà nước. Tài liệu thanh tra công khai về một dự án hạ tầng giao thông sử dụng vốn nhà nước. Nguồn B, 2025-2026. Thông tin nhận diện và giá trị tuyệt đối được ẩn danh trong bản công bố.

■ Ngày nộp bài: 28/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 09/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 25/9/2026

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

Analysis of international environmental changes and their impacts on Vietnam's transportation and logistics industry to enhance logistics management efficiency in the current context

> TS MAI BÁ LĨNH
Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh
Email: linhmb@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu phân tích tác động của biến động môi trường quốc tế đến ngành vận tải và logistics Việt Nam trong bối cảnh hội nhập sâu rộng. Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng hợp tài liệu, so sánh và phân tích xu hướng để đánh giá các biến động về kinh tế, thương mại, địa chính trị, cước vận tải, biến đổi khí hậu, công nghệ và logistics xanh.

Kết quả cho thấy các yếu tố quốc tế tác động mạnh đến nhu cầu và chi phí vận tải, thời gian giao hàng, chuỗi cung ứng, hoạt động xuất nhập khẩu và năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp. Đồng thời, nghiên cứu chỉ ra những hạn chế về dự báo, quản trị rủi ro, kiểm soát chi phí và chuyển đổi số. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất đa dạng hóa thị trường, đẩy mạnh chuyển đổi số, phát triển logistics xanh, nâng cao quản trị rủi ro và tăng cường liên kết nhằm nâng cao khả năng thích ứng và hiệu quả quản trị logistics.

Từ khóa: Môi trường; quốc tế; vận tải; logistics.

ABSTRACT

This study analyzes the impacts of changes in the international environment on Vietnam's transportation and logistics industry in the context of deepening international integration. The study employs literature review, comparative analysis and trend analysis to assess changes in economic conditions, trade, geopolitics, freight rates, climate change, technology and green logistics.

The findings indicate that international factors have significant impacts on transportation demand and costs, delivery times, supply chains, import and export activities and the competitiveness of enterprises. The study also identifies limitations in forecasting, risk management, cost control and digital transformation. Accordingly, the study proposes diversifying markets, accelerating digital transformation, developing green logistics, strengthening risk management and enhancing collaboration to improve adaptability and the effectiveness of logistics management.

Keywords: Environment; international; transportation; logistics.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và hội nhập kinh tế quốc tế ngày càng sâu rộng, ngành vận tải và logistics Việt Nam đang chịu tác động mạnh mẽ từ những biến động của môi trường quốc tế. Các yếu tố như biến động kinh tế toàn cầu, xung đột địa chính trị, thay đổi chính sách thương mại, gián đoạn chuỗi cung ứng, biến động giá nhiên liệu, chuyển đổi số và yêu cầu phát triển xanh đang làm thay đổi nhu cầu vận tải, chi phí logistics, phương thức vận chuyển và cấu trúc chuỗi cung ứng. Những biến động này vừa tạo ra cơ hội mở rộng thị trường, thu hút đầu tư và ứng dụng công nghệ, vừa đặt ra nhiều thách thức đối với năng lực thích ứng và hiệu quả quản trị của doanh nghiệp Việt Nam.

Trong khi đó, năng lực dự báo, quản trị rủi ro, kết nối đa phương thức, chuyển đổi số và kiểm soát chi phí của một số doanh nghiệp

vẫn còn hạn chế. Do đó, việc phân tích những biến động của môi trường quốc tế và đánh giá tác động đến ngành vận tải, logistics Việt Nam có ý nghĩa quan trọng trong việc nhận diện cơ hội, thách thức và đề xuất các định hướng quản trị phù hợp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới nâng cao khả năng thích ứng, hiệu quả hoạt động và tính bền vững của ngành trong bối cảnh hiện nay.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích và tổng hợp tài liệu nhằm nhận diện các biến động của môi trường quốc tế và tác động đến ngành vận tải, logistics Việt Nam. Bên cạnh đó, nghiên cứu sử dụng phương pháp so sánh và phân tích xu hướng để đánh giá sự thay đổi về nhu cầu vận tải, chi phí logistics, chuỗi cung ứng, công nghệ và chính sách quốc tế, từ đó đề xuất định hướng quản trị phù hợp.

3. THỰC TRẠNG BIẾN ĐỘNG MÔI TRƯỜNG QUỐC TẾ CÓ ẢNH HƯỞNG ĐẾN NGÀNH VẬN TẢI, LOGISTICS VIỆT NAM HIỆN NAY

3.1. Biến động kinh tế và thương mại quốc tế

Việt Nam có mức độ hội nhập thương mại rất cao, do đó biến động của thương mại quốc tế có ảnh hưởng trực tiếp đến nhu cầu vận tải và logistics. Theo Bộ Công Thương, 6 tháng đầu năm 2026, tổng kim ngạch xuất nhập khẩu hàng hóa của Việt Nam đạt khoảng 549,69 tỷ USD, tăng 27,1% so với cùng kỳ năm trước; trong đó xuất khẩu đạt 266,52 tỷ USD, tăng 21,0%, còn nhập khẩu đạt 283,17 tỷ USD, tăng 33,5%. Những con số này cho thấy quy mô dòng hàng hóa xuyên biên giới của Việt Nam đang ở mức rất lớn, nhu cầu đối với vận tải, giao nhận, kho bãi và các dịch vụ logistics ngày càng tăng [1, 2].

3.2. Biến động địa chính trị và vận tải biển

Tác động của địa chính trị có thể minh chứng rất rõ qua các tuyến hàng hải quốc tế. Hội đồng Liên hợp quốc về Thương mại và Phát triển (sau đây viết là UNCTAD) cho biết, trong năm 2026, rủi ro tiếp tục thể hiện tại eo biển Hormuz, trong đợt gián đoạn tháng 3/2026, số lượt tàu qua eo biển đã giảm khoảng 95%. Sự gián đoạn này đồng thời gây sức ép lên giá dầu, cước tàu chở dầu, nhiên liệu hàng hải và phí bảo hiểm rủi ro chiến tranh [1, 2, 3].

3.3. Biến động cước vận tải

Số liệu về cước vận tải là một minh chứng rất mạnh cho tác động của môi trường quốc tế. UNCTAD ghi nhận giá cước container giao ngay tăng mạnh trong năm 2024, có thời điểm đạt mức gần tương đương giai đoạn do COVID-19 do khủng hoảng Biển Đỏ, việc chuyển hướng tàu và mất cân đối cung - cầu. Trong giai đoạn đầu của khủng hoảng Biển Đỏ, UNCTAD từng ghi nhận giá cước container giao ngay từ Thượng Hải tăng 122%, trong khi tuyến Thượng Hải - châu Âu tăng tới 256% so với đầu tháng 12/2023. Điều này cho thấy biến động địa chính trị quốc tế có thể chuyển hóa trực tiếp thành biến động chi phí Logistics [1, 2, 3].

3.4. Biến đổi khí hậu và vận tải quốc tế

Biến đổi khí hậu cũng đang tác động trực tiếp đến các tuyến vận tải quốc tế. Chẳng hạn, tình trạng hạn hán tại Kênh đào Panama đã làm giảm số lượng tàu có thể đi qua tuyến này. UNCTAD cho biết đến giữa năm 2024, những gián đoạn tại Biển Đỏ và Kênh đào Panama đã làm nhu cầu tàu toàn cầu tăng khoảng 3% và nhu cầu tàu container tăng khoảng 12% do phải điều chỉnh tuyến vận tải. Điều này cho thấy biến đổi khí hậu không chỉ là vấn đề môi trường mà còn có thể trở thành rủi ro vận tải, chi phí và chuỗi cung ứng [1, 2, 3].

3.5. Phát triển xanh trong vận tải biển

Theo UNCTAD, mặc dù số lượng tàu sử dụng nhiên liệu thay thế đang tăng, hơn 90% đội tàu đang hoạt động vẫn sử dụng nhiên liệu truyền thống. Đồng thời, lượng phát thải khí nhà kính của vận tải biển đã tăng khoảng 5% trong năm 2024. Điều này minh chứng xu hướng Logistics xanh và giảm phát thải không còn chỉ là vấn đề dài hạn mà đang tạo áp lực chuyển đổi đối với ngành vận tải quốc tế [1, 2, 3].

Tổng kết chung: Nhìn tổng thể, các biến động của môi trường quốc tế đang tác động đến ngành vận tải và logistics Việt Nam theo nhiều chiều hướng và mức độ khác nhau. Trong đó, kinh tế và thương mại chủ yếu ảnh hưởng đến nhu cầu và chi phí; công nghệ thúc đẩy thay đổi phương thức quản trị; còn các yêu cầu môi trường tạo áp lực chuyển đổi sang Logistics xanh, các yếu tố ảnh hưởng đến ngành vận tải, logistics Việt Nam hiển thị tại Bảng 1.

Bảng 1. Các yếu tố ảnh hưởng đến ngành vận tải, logistics Việt Nam

Nhóm biến động	Xu hướng hiện nay	Chỉ báo/số liệu minh chứng	Điểm tác động	Mức độ
Kinh tế	Biến động tăng trưởng, lạm phát, tỷ giá, năng lượng	Quy mô thị trường logistics Việt Nam khoảng 45-50 tỷ USD, tương đương khoảng 10% GDP; ngành logistics tăng trưởng khoảng 14-16%/năm	**4/5**	**Cao**
Địa chính trị	Bất ổn, xung đột, thay đổi tuyến vận tải	Khủng hoảng Biển Đỏ khiến lưu lượng qua Suez giảm khoảng 70% so với năm 2023; năm 2026, lưu chuyển qua Hormuz đã giảm khoảng 95%	**5/5**	**Rất cao**
Thương mại	Thay đổi chính sách, thuế quan, hàng rào thương mại	6 tháng đầu năm 2026, tổng kim ngạch xuất nhập khẩu Việt Nam đạt khoảng 549,69 tỷ USD, tăng 27,1%; xuất khẩu tăng 21,0%, nhập khẩu tăng 33,5%	**4/5**	**Cao**
Công nghệ	Phát triển nhanh, đẩy mạnh số hóa và tự động hóa	Chiến lược 2025 - 2035 đặt mục tiêu 80% doanh nghiệp logistics sử dụng giải pháp chuyển đổi số	**4/5**	**Cao**
Môi trường	Yêu cầu giảm phát thải và phát triển xanh ngày càng cao	Vận tải đường bộ chiếm khoảng 85% hoạt động logistics; phát thải vận tải Việt Nam được ước tính khoảng 50 triệu tấn CO_2/năm, có thể lên 90 triệu tấn vào 2030	**4/5**	**Cao**

4. NHỮNG VẤN ĐỀ CẦN GIẢI QUYẾT

Trước những biến động ngày càng phức tạp của môi trường quốc tế, các doanh nghiệp vận tải và logistics Việt Nam đang chịu nhiều tác động đến hoạt động kinh doanh và năng lực cạnh tranh. Qua phân tích thực trạng, một số vấn đề chủ yếu cần được quan tâm và giải quyết gồm:

- Năng lực dự báo và thích ứng với biến động quốc tế còn hạn chế: Doanh nghiệp chưa chủ động dự báo thay đổi về kinh tế, thương mại, chính sách và thị trường vận tải.

- Chi phí logistics biến động và khả năng kiểm soát chi phí còn yếu: Giá nhiên liệu, cước vận tải, tỷ giá và chi phí đầu vào biến động, gây khó khăn cho kiểm soát chi phí và lợi nhuận.

- Chuỗi cung ứng và hoạt động vận tải còn dễ bị gián đoạn: Phụ thuộc vào một số thị trường, đối tác và tuyến vận tải làm gia tăng rủi ro khi môi trường quốc tế biến động.

- Chuyển đổi số và ứng dụng công nghệ chưa đồng đều: Hạ tầng số, dữ liệu, tự động hóa và khả năng ứng dụng AI, IoT trong quản trị logistics còn hạn chế.

- Năng lực quản trị và sức cạnh tranh quốc tế còn hạn chế: Doanh nghiệp còn bất cập về quản trị rủi ro, nguồn nhân lực chất lượng cao, logistics xanh và khả năng đáp ứng các tiêu chuẩn quốc tế.

5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ TÁC ĐỘNG CỦA BIẾN ĐỘNG MÔI TRƯỜNG QUỐC TẾ ĐẾN NGÀNH VẬN TẢI, LOGISTIC VIỆT NAM TRONG BỐI CẢNH HIỆN NAY

Trên cơ sở phân tích những biến động của môi trường quốc tế, có thể thấy ngành vận tải và logistics Việt Nam chịu tác động trên nhiều phương diện. Các tác động này được đánh giá theo mức độ ảnh hưởng đến nhu cầu vận tải, chi phí, tuyến đường, chuỗi cung ứng, xuất nhập khẩu, chuyển đổi số và logistics xanh như sau:

5.1. Tác động đến nhu cầu và sản lượng vận tải

Biến động môi trường quốc tế có tác động 5/5 - rất cao đến nhu cầu và sản lượng vận tải. Hoạt động vận tải phụ thuộc trực tiếp vào quy mô thương mại và dòng hàng hóa quốc tế. Trong 6 tháng đầu năm 2026, tổng kim ngạch xuất nhập khẩu của Việt Nam đạt 549,69 tỷ USD, tăng 27,1% so với cùng kỳ; xuất khẩu đạt 266,52 tỷ USD và nhập khẩu đạt 283,17 tỷ USD. Điều này cho thấy sự gia tăng mạnh của dòng hàng hóa quốc tế kéo theo nhu cầu về vận tải biển, đường bộ, đường sắt, hàng không, kho bãi và các dịch vụ logistics liên quan.

5.2. Tác động đến chi phí vận tải và logistics

Mức tác động được đánh giá 5/5 - rất cao. Các biến động về năng lượng, cước vận tải quốc tế, bảo hiểm và thay đổi tuyến đường trực tiếp làm tăng chi phí logistics. Đặc biệt, việc tàu phải chuyển hướng khỏi các tuyến hàng hải quan trọng làm tăng quãng đường, thời gian khai thác và tiêu hao nhiên liệu. UNCTAD cho biết cước vận tải biển vẫn ở mức cao và biến động mạnh trong bối cảnh các tuyến thương mại bị gián đoạn. Đối với Việt Nam, Chiến lược phát triển logistics 2025 - 2035 đặt mục tiêu giảm chi phí logistics, cho thấy kiểm soát chi phí vẫn là một vấn đề trọng tâm đối với năng lực cạnh tranh của ngành.

5.3. Tác động đến tuyến vận tải và thời gian giao hàng

Đây là nhóm có mức tác động 5/5 - rất cao. Khi các tuyến hàng hải quốc tế bị gián đoạn, doanh nghiệp phải thay đổi hành trình, sử dụng tuyến thay thế hoặc tăng số điểm trung chuyển. UNCTAD ghi nhận đến tháng 5/2025, lượng hàng qua kênh đào Suez vẫn thấp hơn khoảng 70% so với năm 2023, nhiều tàu phải đi vòng qua Mũi Hảo Vọng. Hệ quả là thời gian vận chuyển kéo dài và chi phí dự phòng tăng.

5.4. Tác động đến chuỗi cung ứng

Mức tác động 5/5 - rất cao. Các biến động quốc tế làm gia tăng nguy cơ gián đoạn nguồn cung, thiếu nguyên liệu, chậm giao hàng và phụ thuộc vào một số tuyến hoặc nhà cung cấp nhất định. Vì vậy, doanh nghiệp có xu hướng đa dạng hóa nhà cung cấp, thị trường, tuyến vận tải và phương thức vận chuyển, đồng thời tăng mức dự phòng.

5.5. Tác động đến hoạt động xuất nhập khẩu của Việt Nam

Đây là nhóm có mức tác động 5/5 - rất cao vì vận tải và logistics là cầu nối trực tiếp của hoạt động ngoại thương. Do đó, bất kỳ thay đổi nào về tuyến vận tải, cước phí, thời gian giao hàng, quy định thương mại hoặc rủi ro quốc tế đều có thể tác động đến chi phí xuất nhập khẩu, khả năng tiếp cận thị trường và sức cạnh tranh của hàng hóa Việt Nam.

5.6. Tác động đến chuyển đổi số trong logistics

Mức tác động 4/5 - cao. Môi trường quốc tế biến động làm doanh nghiệp cần kiểm soát hàng hóa, tuyến vận tải, chi phí và rủi ro nhanh hơn. Điều này thúc đẩy ứng dụng AI, IoT, dữ liệu lớn, nền tảng quản lý vận tải, định vị và theo dõi hàng hóa theo thời gian thực.

5.7. Tác động đến từ logistics xanh

Mức tác động 4/5 - cao. Các tiêu chuẩn môi trường quốc tế ngày càng tác động đến phương tiện, nhiên liệu, cảng biển, kho bãi và phương thức vận tải. Việc chuyển hướng tàu trên các tuyến dài hơn cũng làm gia tăng tiêu hao nhiên liệu và phát thải. Vì vậy, doanh nghiệp chịu áp lực đầu tư xanh, các dịch vụ logistics xanh, phương tiện tiết kiệm năng lượng và giải pháp giảm phát thải.

Đánh giá chung: Nhìn chung, biến động môi trường quốc tế có tác động rất cao đến ngành vận tải và logistics Việt Nam, đặc biệt đối với nhu cầu và sản lượng vận tải, chi phí, tuyến vận chuyển, thời gian giao hàng, chuỗi cung ứng và hoạt động xuất nhập khẩu. Đánh giá tác động của biến động môi trường quốc tế đến ngành vận tải, logistics Việt Nam theo Bảng 2.

Bảng 2. Biến động môi trường quốc tế đến ngành vận tải, logistics Việt Nam

Nội dung tác động	Chỉ báo/số liệu minh chứng	Điểm tác động	Đánh giá
Nhu cầu và sản lượng vận tải	6 tháng đầu năm 2026, xuất nhập khẩu Việt Nam đạt 549,69 tỷ USD, tăng 27,1%; xuất khẩu tăng 21,0%, nhập khẩu tăng 33,5%	**5/5**	**Rất cao**
Chi phí vận tải và logistics	Khủng hoảng tuyến Suez làm phát sinh hành trình dài hơn; UNCTAD ghi nhận cước vận tải quốc tế cao và biến động mạnh; chi phí logistics Việt Nam đặt mục tiêu giảm về 12 - 15% GDP	**5/5**	**Rất cao**
Tuyến vận tải và thời gian giao hàng	Đến tháng 5/2025, lượng hàng qua Suez vẫn thấp hơn khoảng 70% so với 2023; tàu phải chuyển hướng quanh Mũi Hảo Vọng	**5/5**	**Rất cao**

Nội dung tác động	Chỉ báo/số liệu minh chứng	Điểm tác động	Đánh giá
Chuỗi cung ứng	UNCTAD đánh giá chuỗi cung ứng toàn cầu vẫn dễ tổn thương; việc chuyển hướng làm tăng khoảng cách vận chuyển; mục tiêu logistics Việt Nam đạt tăng trưởng 12 - 15%/năm	**5/5**	**Rất cao**
Hoạt động xuất nhập khẩu Việt Nam	Xuất nhập khẩu 6 tháng đầu năm 2026 đạt 549,69 tỷ USD; xuất khẩu 266,52 tỷ USD, nhập khẩu 283,17 tỷ USD	**5/5**	**Rất cao**
Chuyển đổi số logistics	Việt Nam đặt mục tiêu 80% doanh nghiệp logistics sử dụng giải pháp chuyển đổi số giai đoạn 2025 - 2035	**4/5**	**Cao**
Logistics xanh	Chiến lược yêu cầu logistics phát triển theo hướng giảm phát thải, chuyển sang năng lượng xanh; mục tiêu nâng cao chất lượng và xanh hóa hoạt động logistics	**4/5**	**Cao**

6. ĐỊNH HƯỚNG THÍCH ỨNG CHO NGÀNH VẬN TẢI, LOGISTIC VIỆT NAM TRONG BỐI CẢNH HIỆN NAY

6.1. Đa dạng hóa thị trường, đối tác và tuyến vận tải

Ngành vận tải và logistics Việt Nam cần đẩy mạnh đa dạng hóa thị trường, đối tác và tuyến vận tải nhằm giảm sự phụ thuộc vào một số thị trường hoặc đối tác nhất định. Doanh nghiệp cần chủ động mở rộng mạng lưới khách hàng, tìm kiếm thị trường mới, đồng thời xây dựng các tuyến vận chuyển thay thế khi xảy ra gián đoạn. Doanh nghiệp xuất nhập khẩu và logistics Việt Nam có thể mở rộng hoạt động từ các tuyến truyền thống với Trung Quốc, Hoa Kỳ và châu Âu sang khai thác thêm thị trường Ấn Độ, Trung Đông và ASEAN; đồng thời kết hợp vận tải biển với đường bộ, đường sắt để chủ động thay đổi phương án vận chuyển khi một tuyến bị gián đoạn.

6.2. Đẩy mạnh chuyển đổi số

Chuyển đổi số là một trong những định hướng quan trọng giúp ngành vận tải và logistics nâng cao hiệu quả hoạt động và khả năng thích ứng. Doanh nghiệp cần ứng dụng công nghệ, thác dữ liệu lớn, trí tuệ nhân tạo, Internet vạn vật và tự động hóa trong quản lý vận tải, kho bãi và chuỗi cung ứng. Ngoài ra, có thể sử dụng hệ thống GPS và phần mềm quản lý vận tải (TMS) để theo dõi xe theo thời gian thực, lựa chọn tuyến đường tối ưu, kiểm soát nhiên liệu và thời gian giao hàng. Trong lĩnh vực kho bãi, có thể sử dụng mã QR, RFID, hệ thống quản lý kho (WMS) để cập nhật số lượng, vị trí hàng hóa.

6.3. Phát triển logistics xanh

Phát triển logistics xanh cần được xem là định hướng lâu dài nhằm đáp ứng yêu cầu giảm phát thải và phát triển bền vững. Doanh nghiệp cần tối ưu hóa tuyến đường, phương thức vận chuyển để giảm nhiên liệu tiêu thụ và lượng khí thải. Doanh nghiệp vận tải có thể sử dụng xe tải điện hoặc xe sử dụng nhiên liệu sạch cho hoạt động giao hàng trong đô thị, đồng thời áp dụng phần mềm tối ưu tuyến đường để giảm quãng đường xe chạy rỗng. Các doanh nghiệp logistics cũng có thể sử dụng kho tiết kiệm năng lượng, điện mặt trời...

6.4. Nâng cao năng lực quản trị rủi ro

Trong bối cảnh chuỗi cung ứng thường xuyên chịu tác động bởi biến động kinh tế, chính sách thương mại và các yếu tố địa chính trị, doanh nghiệp cần nâng cao năng lực nhận diện và ứng phó với rủi ro. Khi một tuyến vận tải biển quốc tế gặp tình trạng ùn tắc, doanh nghiệp logistics có thể chuyển một phần hàng hóa sang tuyến khác hoặc kết hợp đường biển với đường sắt, đường bộ để hạn chế chậm giao hàng. Đối với rủi ro giá nhiên liệu tăng, doanh nghiệp có thể ký hợp đồng dài hạn, tối ưu tải trọng và tuyến vận chuyển hoặc điều chỉnh phụ phí nhiên liệu.

7. THẢO LUẬN

Những vấn đề trên cho thấy doanh nghiệp vận tải và logistics Việt Nam còn hạn chế về khả năng thích ứng, kiểm soát chi phí, quản trị rủi ro và ứng dụng công nghệ. Vì vậy, cần tăng cường năng lực dự báo, chuyển đổi số, đa dạng hóa chuỗi cung ứng và nâng cao chất lượng nguồn nhân lực để nâng cao hiệu quả quản trị và sức cạnh tranh.

8. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy biến động môi trường quốc tế đang tác động mạnh đến ngành vận tải và logistics Việt Nam, đặc biệt về nhu cầu vận tải, chi phí, chuỗi cung ứng, công nghệ và logistics xanh. Doanh nghiệp cần chủ động nâng cao năng lực dự báo, quản trị rủi ro, đa dạng hóa thị trường và tuyến vận tải, đẩy mạnh chuyển đổi số và phát triển nguồn nhân lực nhằm nâng cao khả năng thích ứng, hiệu quả quản trị và năng lực cạnh tranh.

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] Logistics Việt Nam. Thị trường logistics và quản lý chuỗi cung ứng Việt Nam và thế giới tháng 1 năm 2026: Diễn biến và dự báo.

■ Ngày nộp bài: 07/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 29/9/2026

Phân tích các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý chất lượng công trình Nhà máy Thủy điện Trị An mở rộng bằng mô hình tích hợp Delphi-AHP

Analysis of factors affecting quality management of the Tri An Hydropower Plant Expansion project using an integrated Delphi-AHP model

> KS TRẦN NHẬT MINH[1], TS ĐẶNG VĂN PHÚ[2,*]
[1]Ban Quản lý dự án Điện 3 - Chi nhánh Tập đoàn Điện lực Việt Nam
[2]Trường Đại học Thủy lợi
[*]Email: phudv@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích các nhân tố ảnh hưởng đến công tác quản lý chất lượng (QLCL) công trình Nhà máy Thủy điện (NMTĐ) Trị An mở rộng. Mô hình tích hợp Delphi-AHP được sử dụng để nhận diện, sàng lọc và định lượng mức độ ảnh hưởng của các nhân tố đến công tác QLCL công trình. Kết quả cho thấy nhóm nhân tố thuộc năng lực quản trị nội tại của chủ đầu tư/ban quản lý dự án (bao gồm năng lực cán bộ, bộ máy tổ chức và hệ thống quy trình QLCL) chiếm tổng trọng số cao nhất (39,74%), tiếp theo là nhóm điều kiện thực hiện dự án (28,16%) và nhóm năng lực nhà thầu (23,10%). Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học để xác định các giải pháp ưu tiên hoàn thiện công tác QLCL công trình thủy điện tại Việt Nam.

Từ khóa: Quản lý chất lượng công trình; Delphi-AHP; Nhà máy thủy điện; Trị An mở rộng; phân tích đa tiêu chí.

ABSTRACT

This paper analyzes factors affecting quality management of the Tri An Hydropower Plant Expansion project. An integrated Delphi-AHP model was employed to identify, screen, and quantify the influence of factors affecting construction QM. Results show that internal management capacity factors of the Investor/PMB (comprising personnel competence, organizational structure and QM procedures) hold the highest combined weight (39.74%), followed by project execution conditions (28.16%) and contractor capacity (23.10%). The findings provide a scientific basis for prioritizing QM improvement measures for hydropower projects in Vietnam.

Keywords: Construction quality management; Delphi-AHP; hydropower plant; Tri An expansion; multi-criteria analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh phát triển hệ thống điện quốc gia để đáp ứng nhu cầu tăng trưởng kinh tế, các dự án nguồn điện trọng điểm đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo an ninh năng lượng. Theo Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, thủy điện tiếp tục là nguồn năng lượng tái tạo quan trọng [1]. Trong đó, dự án NMTĐ Trị An mở rộng là một trong những dự án nguồn điện trọng điểm với công suất lắp đặt 200 MW, tổng mức đầu tư khoảng 3.965 tỷ đồng, trong đó 70% vốn vay thương mại trong nước và từ Ngân hàng Tái thiết và Phát triển Đức (KfW).

QLCL CTXD là một trong những nội dung trọng tâm của công tác quản lý dự án đầu tư xây dựng, ảnh hưởng trực tiếp đến tính an toàn, tuổi thọ và hiệu quả khai thác công trình [2]. Đối với công trình thủy điện, chất lượng công trình còn liên quan mật thiết đến an toàn đập và hạ tầng năng lượng vùng hạ du [3]. Tại Việt Nam, khung pháp lý về QLCL CTXD đã được quy định chi tiết qua Luật Xây dựng và các nghị định hướng dẫn, tuy nhiên việc triển khai thực tế tại các dự án lớn vẫn còn nhiều thách thức, đặc biệt đối với các dự án có yếu tố nước ngoài và yêu cầu kỹ thuật phức tạp.

Ban Quản lý dự án Điện 3 (EVNPMB3) - đơn vị được EVN giao quản lý dự án NMTĐ Trị An mở rộng đang đối mặt với những khó khăn đặc thù trong công tác QLCL: (i) Dự án có cấp thiết kế Cấp đặc biệt với yêu cầu kỹ thuật công nghệ cao; (ii) áp lực kép giữa mục tiêu chất lượng và tiến độ hoàn thành công trình; (iii) quy trình QLCL phải đồng thời đáp ứng quy định pháp luật Việt Nam

và tiêu chuẩn quốc tế; (iv) là dự án thủy điện đầu tiên tại Việt Nam áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) từ giai đoạn thiết kế cơ sở; (v) nguồn nhân lực quản lý mỏng, phải kiêm nhiệm nhiều dự án cùng lúc.

Vấn đề QLCL và các nhân tố ảnh hưởng đến dự án xây dựng đã được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới và tại Việt Nam. Arditi và Gunaydin [4] chỉ ra rằng QLCL trong xây dựng mang tính hệ thống, chịu sự chi phối lớn từ cam kết của ban quản lý và năng lực nhân sự. Đối với các dự án xây dựng quy mô lớn tại các nước đang phát triển, Long và cộng sự [5] xác định năng lực quản lý và kinh nghiệm của chủ đầu tư là nguyên nhân then chốt ảnh hưởng đến hiệu quả thực hiện dự án tại Việt Nam. Trong lĩnh vực công trình thủy, Nguyễn Hữu Huế và Nguyễn Văn Sơn [6] cùng với Lê Trung Thành và Nguyễn Viết Cường [7] cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của năng lực nhà thầu và sự phối hợp đồng bộ giữa các bên liên quan. Để nhận diện và lượng hóa mức độ ảnh hưởng của các nhân tố phức tạp, mô hình tích hợp giữa phương pháp phân tích thứ bậc AHP [8] và phương pháp chuyên gia Delphi [9] với độ tin cậy nội dung CVR theo Lawshe [10] đã được chứng minh là công cụ hiệu quả trong đánh giá đa tiêu chí và giải quyết các bài toán ra quyết định phức tạp trong xây dựng. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước trước đây chủ yếu tập trung vào tiến độ thi công hoặc công trình xây mới nói chung, mà chưa có nghiên cứu chuyên sâu lượng hóa các nhân tố ảnh hưởng đến QLCL đối với dự án thủy điện mở rộng xây dựng cận kề công trình đang vận hành với các yêu cầu kỹ thuật đặc thù.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm mục tiêu: (i) Nhận diện và sàng lọc các nhân tố ảnh hưởng đến công tác QLCL công trình NMTĐ Trị An mở rộng thông qua phương pháp Delphi; (ii) định lượng và xếp hạng mức độ ảnh hưởng tương đối của các nhân tố bằng mô hình AHP; (iii) thảo luận các đề xuất giải pháp quản lý nhằm nâng cao hiệu quả QLCL đối với dự án thủy điện tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp Delphi

Phương pháp Delphi do Dalkey và Helmer phát triển vào năm 1963 [9] là chiến lược để đạt đồng thuận bằng cách thu thập ý kiến định tính từ nhóm chuyên gia. Trong bài báo này, phương pháp Delphi được thực hiện qua hai giai đoạn như sau:

Giai đoạn 1: Phát triển danh mục sơ bộ: Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, bài báo khoa học và phân tích thực tiễn dự án, nghiên cứu xác định sơ bộ các nhân tố ảnh hưởng đến QLCL công trình thủy điện. Một bảng câu hỏi mở được gửi đến 5 chuyên gia đại diện cho các nhóm chủ thể chính tham gia dự án NMTĐ Trị An mở rộng.

Giai đoạn 2: Vòng Delphi thứ nhất và thứ hai: Phiếu khảo sát được thiết kế theo thang Likert 5 mức (1 = "Không đồng ý" đến 5 = "Hoàn toàn đồng ý") và gửi đến nhóm 20 chuyên gia. Tiêu chí lựa chọn chuyên gia bao gồm: (i) Có tối thiểu 5 năm kinh nghiệm trong lĩnh vực xây dựng công trình thủy điện hoặc thủy lợi; (ii) đã và đang trực tiếp tham gia thực hiện dự án NMTĐ Trị An mở rộng hoặc các dự án nguồn điện tương đương; (iii) đảm bảo đại diện từ các nhóm chủ thể có vai trò khác nhau trong QLCL công trình (Bảng 1). Kết quả mỗi vòng được đánh giá bằng hai chỉ số: Giá trị trung bình (Mean ≥ 3,5) và tỷ số giá trị nội dung CVR theo Lawshe [10].

Công thức CVR được tính như sau:

$$CVR = \frac{n_e - N/2}{N/2} \quad (1)$$

Trong đó: ne là số chuyên gia đánh giá nhân tố ở mức "thiết yếu" (tương ứng với mức 4 và 5 trên thang Likert), N là tổng số chuyên gia tham gia khảo sát. Với nhóm 20 chuyên gia, ngưỡng CVR tối thiểu là 0,42 ở mức ý nghĩa 0,05 [10]. Các nhân tố có Mean < 3,5 hoặc CVR < 0,42 sẽ bị loại bỏ khỏi danh mục. Nhân tố mới có thể được bổ sung nếu có đề xuất từ chuyên gia và đạt đồng thuận.

Bảng 1. Cơ cấu chuyên gia tham gia khảo sát

STT	Nhóm chủ thể	Delphi (Vòng 1, 2)	AHP (Vòng 3)
1	Chủ đầu tư/Ban QLDA Điện 3	8	5
2	Nhà thầu tư vấn thiết kế	2	2
3	Nhà thầu giám sát thi công XD	3	2
4	Nhà thầu thi công xây dựng	4	2
5	Cơ quan quản lý nhà nước	3	1
	Tổng	**20**	**12**

2.2. Phương pháp phân tích thứ bậc (AHP)

Phương pháp phân tích thứ bậc AHP do Giáo sư Thomas L. Saaty phát triển năm 1980 [8], cho phép chuyển đổi các đánh giá chủ quan của chuyên gia thành bộ trọng số định lượng phản ánh mức độ ảnh hưởng tương đối giữa các nhân tố. Quy trình AHP trong nghiên cứu này gồm 4 bước:

Bước 1: Lập ma trận so sánh cặp: Kết quả đánh giá từ 12 chuyên gia được tổng hợp bằng phương pháp trung bình nhân để tạo ma trận đồng thuận.

Bước 2: Tính vector trọng số: Vector trọng số $W = (w_1, w_2, ..., w_n)^T$ được xác định bằng phương pháp trung bình nhân chuẩn hóa.

Bước 3: Tính giá trị riêng cực đại λ_{max}.

Bước 4: Kiểm tra tính nhất quán: Chỉ số nhất quán (CI) và tỷ số nhất quán (CR):

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \quad CR = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \quad (2)$$

Trong đó: RI là chỉ số ngẫu nhiên tra bảng Saaty [8]. Với n = 10, RI = 1,49. Ma trận so sánh cặp được chấp nhận khi CR < 0,1 (10%), nghĩa là mức độ nhất quán trong đánh giá của chuyên gia nằm trong phạm vi cho phép.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Nhận diện các nhân tố ảnh hưởng

Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, phân tích thực trạng dự án và kết quả phỏng vấn 5 chuyên gia, nghiên cứu đã xác định 9 nhân tố ảnh hưởng ban đầu đến công tác QLCL công trình NMTĐ Trị An mở rộng (Bảng 2). Các nhân tố này bao phủ 4 khía cạnh chính: Năng lực nội tại của chủ đầu tư/ban quản lý dự án (F1, F2), năng lực các đơn vị tham gia dự án (F4, F5), điều kiện thực hiện (F3, F6, F8) và khung pháp lý - công nghệ (F7, F9).

3.2. Kết quả vòng Delphi thứ nhất

Kết quả khảo sát vòng 1 với 20 chuyên gia được trình bày tại Bảng 2. Tất cả 9 nhân tố đều đạt ngưỡng Mean ≥ 3,5 và CVR ≥ 0,42, đủ điều kiện đưa vào vòng tiếp theo. Đáng chú ý, nhân tố F5 (năng lực nhà thầu thi công) đạt Mean = 4,90 và CVR = 1,000, cho thấy 100% chuyên gia đánh giá nhân tố này ở mức "Đồng ý" hoặc "Hoàn toàn đồng ý". Tương tự, nhân tố F4 (năng lực nhà thầu tư vấn) cũng đạt CVR = 1,000. Ngoài ra, nhóm chuyên gia đề xuất bổ sung nhân tố F10 - "Hệ thống quy trình QLCL CTXD của Ban QLDA" – vào danh mục khảo sát vòng 2, nâng tổng số nhân tố lên 10.

3.3. Kết quả vòng Delphi thứ hai

Vòng khảo sát thứ hai với 10 nhân tố cho thấy xu hướng hội tụ rõ ràng: Các nhân tố có Mean cao ở vòng 1 (F1 = 4,75; F4 = 4,80; F5 = 4,90) giảm nhẹ trong vòng 2, trong khi các nhân tố có Mean thấp (F7 = 4,15; F8 = 4,00) tăng lên (Bảng 2). Biên độ dao động Mean giữa hai vòng nằm trong khoảng 0,05 - 0,35 điểm, cho thấy mức độ đồng

thuận của chuyên gia ổn định và quá trình phản hồi Delphi có tác dụng điều chỉnh ý kiến. Hiện tượng "hội tụ về trung tâm" này phù hợp với đặc trưng lý thuyết của phương pháp Delphi [9]. Tất cả 10 nhân tố đều đạt ngưỡng chấp nhận, đủ điều kiện làm dữ liệu đầu vào cho mô hình AHP.

Bảng 2. Kết quả khảo sát Delphi

STT	Ký hiệu	Nhân tố	Vòng 1		Vòng 2		Kết quả
			Mean	CVR	Mean	CVR	
1	F1	Kinh nghiệm, năng lực QLCL và điều hành dự án của cán bộ chủ đầu tư/ban quản lý dự án	4,75	0,90	4,55	0,80	Đạt
2	F2	Bộ máy tổ chức đồng bộ, thống nhất giữa các bộ phận chủ đầu tư / ban quản lý dự án	4,20	0,50	4,30	0,60	Đạt
3	F3	Công tác bồi thường, giải phóng mặt bằng và bàn giao mặt bằng thi công	4,65	0,90	4,60	0,90	Đạt
4	F4	Năng lực và kinh nghiệm của nhà thầu tư vấn (KS, TKXD, GS TCXD)	4,80	1,00	4,60	0,80	Đạt
5	F5	Năng lực và kinh nghiệm của nhà thầu thi công xây dựng công trình	4,90	1,00	4,60	0,70	Đạt
6	F6	Điều kiện thi công và mức độ phức tạp của công trình	4,50	0,70	4,25	0,60	Đạt
7	F7	Cơ chế chính sách, quy định pháp luật, tiêu chuẩn và quy chuẩn kỹ thuật	4,15	0,50	4,25	0,70	Đạt
8	F8	Vật liệu xây dựng, thiết bị công trình và thiết bị công nghệ	4,00	0,50	4,35	0,80	Đạt
9	F9	Áp dụng các giải pháp, công nghệ mới (BIM, CDE, GIS...)	4,35	0,70	4,15	0,50	Đạt
10	F10	Hệ thống quy trình QLCL CTXD của ban quản lý dự án	-	-	4,05	0,50	Đạt
		Ngưỡng chấp nhận	≥ 3,50	≥ 0,42	≥ 3,50	≥ 0,42	

3.4. Kết quả phân tích AHP

Ma trận so sánh cặp tổng hợp (trung bình nhân) được trình bày tại Bảng 3. Kết quả tính toán vector trọng số và kiểm tra tính nhất quán cho thấy: λ_{max} = 10,008; CI = 0,0009; CR = 0,0006 < 0,1, thỏa mãn điều kiện nhất quán. Bảng 4 trình bày kết quả xếp hạng theo trọng số.

Bảng 3. Ma trận so sánh cặp các nhân tố

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
F1	1,000	1,201	1,505	1,316	1,373	1,570	2,557	1,721	3,365	1,201
F2	0,833	1,000	1,253	1,096	1,201	1,373	2,466	1,433	3,091	1,000
F3	0,665	0,798	1,000	0,833	0,913	1,096	2,067	1,201	2,590	0,798
F4	0,760	0,913	1,201	1,000	1,096	1,316	2,607	1,442	3,267	0,913
F5	0,728	0,833	1,096	0,913	1,000	1,201	2,265	1,316	2,703	0,875
F6	0,637	0,728	0,913	0,760	0,833	1,000	1,886	1,096	2,607	0,765
F7	0,391	0,406	0,484	0,384	0,442	0,530	1,000	0,581	1,253	0,426
F8	0,581	0,698	0,833	0,693	0,760	0,913	1,721	1,000	2,265	0,698
F9	0,297	0,324	0,386	0,306	0,370	0,384	0,798	0,442	1,000	0,324
F10	0,833	1,000	1,253	1,096	1,144	1,308	2,348	1,433	3,091	1,000

Bảng 4. Kết quả phân tích AHP

Xếp hạng	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nhân tố	F1	F2	F10	F4	F5	F3	F6	F8	F7	F9
Wi (%)	14,66	12,63	12,45	12,11	10,99	10,13	9,43	8,60	5,05	3,95

3.5. Phân nhóm nhân tố

Kết quả xếp hạng cho phép phân thành 4 nhóm nhân tố theo tính chất và mức độ ảnh hưởng (Bảng 5). Nhóm I - Năng lực quản trị nội tại của CĐT/Ban QLDA (F1 + F2 + F10) chiếm tổng trọng số cao nhất với 39,74%, bao gồm các nhân tố mà EVNPMB3 có thể chủ động kiểm soát và cải thiện. Nhóm III - Điều kiện thực hiện dự án (F3 + F6 + F8) chiếm 28,16%, phản ánh các yếu tố bối cảnh cần được quản lý rủi ro chủ động. Nhóm II - Năng lực nhà thầu (F4 + F5) chiếm 23,10%, là nhóm chỉ có thể kiểm soát gián tiếp thông qua cơ chế đấu thầu và giám sát hợp đồng. Nhóm IV - Khung pháp lý và công nghệ (F7 + F9) chiếm 9,00%, đóng vai trò nền tảng hỗ trợ.

Bảng 5. Phân nhóm nhân tố theo tính chất và mức độ ảnh hưởng

Nhóm	Nhân tố	Tổng Wi (%)	Đặc trưng
I - Năng lực quản trị nội tại của CĐT/Ban QLDA	F1, F2, F10	39,74	Nội tại, kiểm soát được
II - Năng lực nhà thầu	F4, F5	23,10	Đối tác, kiểm soát gián tiếp
III - Điều kiện thực hiện DA	F3, F6, F8	28,16	Bối cảnh, quản lý rủi ro
IV - Pháp lý và công nghệ	F7, F9	9,00	Hỗ trợ, điều kiện nền

4. THẢO LUẬN

4.1. Thảo luận kết quả phân tích các nhóm nhân tố

Kết quả nghiên cứu cho thấy công tác QLCL công trình NMTĐ Trị An mở rộng mang tính hệ thống cao, thể hiện qua sự phân bố trọng số giữa các nhóm nhân tố:

Thứ nhất, nhóm năng lực quản trị nội tại của chủ đầu tư/ban quản lý dự án (F1 + F2 + F10 = 39,74%) giữ vai trò chi phối cao nhất. Phát hiện này hoàn toàn tương đồng với các nghiên cứu của Arditi và Gunaydin [4], Long và cộng sự [5], khẳng định vai trò quyết định của năng lực điều hành, cơ cấu tổ chức và quy trình nội bộ của chủ đầu tư đối với chất lượng dự án năng lượng quy mô lớn.

Thứ hai, nhóm điều kiện thực hiện (F3 + F6 + F8 = 28,16%) và nhóm năng lực nhà thầu (F4 + F5 = 23,10%) giữ mức ảnh hưởng đáng kể tiếp theo. Khác với các nghiên cứu thuần túy về tiến độ (nơi giải phóng mặt bằng và nhà thầu thường xếp đầu [6, 7]), trong bài toán QLCL, các yếu tố này tác động gián tiếp hoặc ít rủi ro hơn do dự án đã lựa chọn được liên danh nhà thầu có năng lực mạnh. Tuy nhiên, các đặc thù về địa chất, thi công nổ mìn sát công trình hiện hữu (F6) và thiết bị cơ điện nhập khẩu (F8) vẫn đòi hỏi sự kiểm soát rủi ro nghiêm ngặt.

Thứ ba, nhóm khung pháp lý và công nghệ (F7 + F9 = 9,00%) có trọng số thấp nhất, phản ánh thực tế hệ thống quy chuẩn kỹ thuật đã tương đối ổn định, trong khi công nghệ số và BIM (F9 = 3,95%) hiện mới ở giai đoạn thí điểm theo định hướng của Quyết định số 258/QĐ-TTg [11], được nhìn nhận là công cụ hỗ trợ hơn là yếu tố quyết định chất lượng.

Đáng chú ý, biên độ chênh lệch giữa 6 nhân tố đứng đầu (F1-F5, F10) chỉ khoảng 3,67%, cho thấy QLCL công trình thủy điện là bài toán tổng hợp, đòi hỏi sự phối hợp đồng bộ giữa các bên tham gia, không thể phụ thuộc cục bộ vào bất kỳ nhân tố đơn lẻ nào [4].

4.2. Đề xuất giải pháp quản lý

Từ kết quả định lượng trọng số, nghiên cứu đề xuất 5 nhóm giải pháp trọng tâm nhằm nâng cao hiệu quả QLCL tại EVNPMB3:

(1) Kiện toàn tổ chức và nâng cao năng lực nhân sự (F1, F2): Đào tạo chuyên sâu về kỹ năng quản lý dự án theo chuẩn quốc tế; kiện toàn bộ máy theo hướng chuyên môn hóa, tách bạch chức năng quản lý đầu tư và quản trị chất lượng kỹ thuật.

(2) Chuẩn hóa hệ thống quy trình QLCL tích hợp (F10): Rà soát, chuẩn hóa và tích hợp quy định nội bộ của EVN với thông lệ hợp đồng quốc tế (FIDIC) và yêu cầu của nhà tài trợ vốn (KfW), loại bỏ xung đột quy trình.

(3) Kiểm soát chặt chẽ năng lực nhà thầu (F4, F5): Thiết lập hệ thống đánh giá hiệu suất (KPI) xuyên suốt từ khâu xét thầu đến thi công; siết chặt kiểm tra nhân sự chủ chốt và thiết bị thi công đặc chủng.

(4) Chủ động quản lý rủi ro hiện trường (F3, F6, F8): Xây dựng kịch bản kiểm soát rủi ro kỹ thuật cho công tác nổ mìn hố móng sát công trình hiện hữu, ứng phó mùa mưa kéo dài và quản lý chuỗi cung ứng thiết bị cơ điện nhập khẩu.

(5) Đẩy mạnh ứng dụng công nghệ số và BIM/CDE (F9): Khai thác thực chất môi trường dữ liệu chung (CDE) làm nền tảng kiểm duyệt, lưu vết hồ sơ chất lượng; sử dụng mô hình BIM 3D phục vụ nghiệm thu hình học và phát hiện xung đột thi công.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công mô hình tích hợp Delphi-AHP để nhận diện, sàng lọc và định lượng 10 nhân tố ảnh hưởng đến công tác QLCL công trình NMTĐ Trị An mở rộng tại EVNPMB3. Thông qua hai vòng Delphi với 20 chuyên gia và phân tích AHP với 12 chuyên gia, kết quả cho thấy QLCL công trình thủy điện mang tính hệ thống, trong đó nhóm năng lực quản trị nội tại của chủ đầu tư/ ban quản lý dự án (39,74%) giữ vai trò quan trọng nhất nhưng không chi phối tuyệt đối, cần đồng thời kiểm soát năng lực nhà thầu (23,10%) và quản lý rủi ro từ điều kiện thực hiện dự án (28,16%). Năm giải pháp quản lý được đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả QLCL, tập trung vào: Nâng cao năng lực nhân sự, chuẩn hóa quy trình, kiểm soát nhà thầu, quản lý rủi ro và ứng dụng công nghệ số.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 500/QĐ-TTg ngày 15/5/2023 phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050.

[2] Chính phủ. Nghị định số 06/2021/NĐ-CP ngày 26/01/2021 quy định chi tiết một số nội dung về QLCL, thi công xây dựng và bảo trì CTXD.

[3] Chính phủ. Nghị định số 114/2018/NĐ-CP ngày 04/9/2018 về quản lý an toàn đập, hồ chứa nước.

[4] Arditi, D. and HM Gunaydin. 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] Long, N.D., S. Ogunlana, T. Quang and KC Lam. Large construction projects in developing countries: a case study from Vietnam. International Journal of Project Management, vol. 22, no. 7, pp. 553-561, 2004, doi: 10.1016/j.ijproman.2004.03.004.

[6] Nguyễn Hữu Huế, Nguyễn Văn Sơn. Nghiên cứu mức độ ảnh hưởng của các nhân tố gây chậm tiến độ thi công công trình thủy lợi, thủy điện ở Việt Nam. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, số 67, tr. 93-100, 2019.

[7] Lê Trung Thành, Nguyễn Viết Cường. Thực trạng công tác quản lý tiến độ xây dựng công trình kè khu vực TP Hồ Chí Minh và giải pháp đề xuất. Tạp chí Xây dựng, số 06, tr. 185-189, 2026.

[8] Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, 1980.

[9] Dalkey, N. and O Helmer. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. Management Science, vol. 9, no. 3, pp. 458-467, 1963, doi: 10.1287/mnsc.9.3.458.

[10] Lawshe, C.H. A quantitative approach to content validity. Personnel Psychology, vol. 28, no. 4, pp. 563-575, 1975, doi: 10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x.

[11] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 258/QĐ-TTg ngày 17/3/2023 phê duyệt Lộ trình áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) trong hoạt động xây dựng.

■ Ngày nộp bài: 10/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 18/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/10/2026

Xác lập chỉ tiêu kiểm soát trong quản lý khai thác cơ sở vật chất tại các cơ sở giáo dục đại học công lập Việt Nam bằng phương pháp Fuzzy Delphi

Identifying control indicators for facility utilization management in Vietnamese public higher education institutions using the Fuzzy Delphi Method

> THS NGÔ TOÀN THẮNG[1], PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI[2,*], TS ĐỖ THỊ HUYỀN[3]
[1]Trường Đại học Gia Định
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[3]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[*]Email: hainl@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm xác lập và sàng lọc các chỉ tiêu mô tả chức năng kiểm soát trong quản lý khai thác cơ sở vật chất (CSVC) tại các cơ sở giáo dục đại học (CSGDĐH) công lập Việt Nam. Trên cơ sở tổng quan lý thuyết, 9 chỉ tiêu thuộc ba nhóm nội dung được đề xuất và đánh giá bằng phương pháp Fuzzy Delphi với sự tham gia của 12 chuyên gia. Kết quả cho thấy chỉ tiêu về kiểm tra nội bộ về khai thác, bảo trì CSVC định kỳ theo kế hoạch và kiểm tra đột xuất khi cần thiết đạt ngưỡng lựa chọn. Kết quả phản ánh hoạt động kiểm soát được nhận diện rõ nhất thông qua hành động kiểm tra cụ thể và bằng chứng có thể kiểm chứng. Nghiên cứu cung cấp căn cứ khoa học để củng cố kiểm tra nội bộ, tăng cường theo dõi khắc phục và chuẩn hóa dữ liệu phục vụ quản lý CSVC.

Từ khóa: Cơ sở giáo dục đại học công lập; cơ sở vật chất; Fuzzy Delphi; kiểm soát; quản lý khai thác.

ABSTRACT

This study aims to identify and screen indicators describing the control function in facility utilization management at Vietnamese public higher education institutions. Based on a theoretical review, nine indicators across three dimensions were proposed and evaluated using the Fuzzy Delphi method with the participation of 12 experts. The results indicate that KS2, which concerns planned periodic internal inspections and ad hoc inspections when necessary, met the acceptance threshold. The findings suggest that the control function is most clearly recognized through specific inspection activities supported by verifiable evidence. This study provides a scientific basis for strengthening internal inspections, improving the monitoring of corrective actions and standardizing data to support facility management.

Keywords: Control function; facility utilization management; Fuzzy Delphi; public higher education institutions; Vietnam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đối với CSGDĐH công lập, CSVC vừa là tài sản công, nguồn lực phục vụ sứ mạng giáo dục và là một bộ phận quan trọng trong năng lực tự chủ của nhà trường. Vì vậy, quản lý khai thác (QLKT) CSVC không chỉ bao gồm sử dụng, vận hành hay bảo trì từng tài sản riêng lẻ, mà là quá trình quản lý có mục tiêu, kế hoạch, tổ chức thực hiện, điều hành và kiểm soát. Trong đó, kiểm soát giúp nhà quản lý theo dõi tình trạng thực hiện, đối chiếu kết quả với mục tiêu và tiêu chuẩn, phát hiện sai lệch, xác định nguyên nhân và thực hiện điều chỉnh cần thiết [12, 26, 27, 29]. Báo cáo quản lý, sử dụng tài sản công năm 2025 của Bộ Giáo dục và Đào tạo cho thấy việc tổng kiểm kê và chuẩn hóa dữ liệu đã được tăng cường, nhưng một số đơn vị chưa cập nhật đầy đủ, kịp thời dữ liệu tài sản; thông tin về nguyên giá và giá trị còn lại của một số tài sản chưa hoàn chỉnh, gây khó khăn cho tổng hợp và theo dõi [1]. Một số CSGDĐH đã kết hợp kiểm kê thực tế, hồ sơ và phần mềm quản lý tài sản [2, 4], trong khi nơi khác vẫn gặp hạn chế do phần mềm lỗi thời và cán bộ quản lý tài sản chủ yếu làm việc kiêm nhiệm [32]. Những biểu hiện này cho thấy kiểm soát không chỉ phụ thuộc vào việc có quy định hay công cụ, mà còn phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu, quy trình đối chiếu, trách nhiệm của chủ thể và khả năng sử dụng kết quả kiểm tra để xử lý sai lệch. Các nghiên cứu trước đã đề cập khá rộng đến đo

lường hiệu suất CSVC, kiểm tra công trình, bảo trì, đánh giá sau sử dụng và cải tiến liên tục [27, 20, 25, 26, 29]. Tuy nhiên, còn thiếu một hệ thống chỉ tiêu được sàng lọc theo ý kiến chuyên gia để phản ánh riêng chức năng kiểm soát trong QLKT CSVC tại các CSGDĐH công lập Việt Nam.

Từ vấn đề trên, nghiên cứu trả lời hai câu hỏi: (1) Chức năng kiểm soát trong QLKT CSVC tại các CSGDĐH công lập có thể được mô tả bởi những nhóm nội dung và chỉ tiêu nào; (2) chỉ tiêu nào đạt ngưỡng đánh giá tổng hợp của nhóm chuyên gia theo phương pháp Fuzzy Delphi.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế nghiên cứu và lựa chọn chuyên gia

Nghiên cứu kết hợp tổng quan tài liệu, phương pháp chuyên gia và Fuzzy Delphi. Phạm vi phân tích của bài báo bao gồm việc xác lập, đánh giá và sàng lọc chín chỉ tiêu này bằng Fuzzy Delphi [9, 10].

Nhóm khảo sát gồm 12 chuyên gia, có chuyên môn hoặc lĩnh vực công tác liên quan đến quản lý giáo dục, CSVC, tài sản công, đầu tư xây dựng, quản trị đại học hoặc tài chính công; có kinh nghiệm trong quản lý, sử dụng, vận hành, bảo trì, sửa chữa hoặc khai thác CSVC tại CSGDĐH công lập; hiểu cơ chế quản lý, phân cấp và tự chủ; có khả năng đánh giá độc lập nội dung phiếu khảo sát.

Bảng 1. Cơ cấu chuyên gia tham gia khảo sát

Nhóm chuyên gia	Số lượng	Tỷ lệ (%)	Góc nhìn chính
Cán bộ quản lý nhà nước	3	25	Thể chế, chính sách và yêu cầu quản lý tài sản công
Lãnh đạo quản lý tại CSGDĐH	3	25	Quản trị nhà trường, phân bổ nguồn lực và ra quyết định
Cán bộ trực tiếp QLKT CSVC	6	50	Quy trình thực hiện, vận hành, bảo trì và tính khả thi
Tổng cộng	**12**	**100**	

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

2.2. Quy trình Fuzzy Delphi

Các chuyên gia đánh giá mức độ quan trọng của từng chỉ tiêu theo thang năm mức: 1 - Rất không quan trọng; 2 - Không quan trọng; 3 - Trung lập; 4 - Quan trọng và 5 - Rất quan trọng. Đánh giá ngôn ngữ được chuyển thành số mờ tam giác tương ứng như Bảng 2.

Bảng 2. Thang đánh giá và số mờ tam giác

Mức đánh giá	Số mờ tam giác (l, m, u)
Rất không quan trọng	(0,00; 0,00; 0,25)
Không quan trọng	(0,00; 0,25; 0,50)
Trung lập	(0,25; 0,50; 0,75)
Quan trọng	(0,50; 0,75; 1,00)
Rất quan trọng	(0,75; 1,00; 1,00)

Nguồn: Thang đo sử dụng trong khảo sát Fuzzy Delphi.

Với chỉ tiêu j, đánh giá của chuyên gia i được biểu diễn bởi số mờ tam giác $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$. Giá trị mờ tổng hợp của chỉ tiêu được xác định theo:

$\tilde{w}_j = (a_j, b_j, c_j)$; $a_j = \min_k(l_{jk})$; $b_j = \prod_{k=1}^{n} (m_{jk})^{1/n}$; $c_j = \max_k(u_{jk})$.

Trong đó: n = 12 là số chuyên gia. Giá trị rõ của chỉ tiêu được tính bằng phương pháp giải mờ trung bình:

$S_j = (a_j + b_j + c_j)/3$

Ngưỡng lựa chọn được tính bằng trung bình của các giá trị giải mờ [17, 9]. Ngưỡng 0,6775 được tính trên toàn bộ chỉ tiêu của nghiên cứu tổng thể, không tính lại riêng cho các chỉ tiêu của chức năng kiểm soát.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Hệ thống chỉ tiêu đề xuất

Trong QLKT CSVC tại các CSGDĐH công lập, chức năng kiểm soát không chỉ được thực hiện sau khi công việc đã hoàn thành mà diễn ra trong toàn bộ quá trình sử dụng, vận hành, bảo trì và sửa chữa. Chức năng kiểm soát được xem xét theo ba nhóm nội dung sau:

Thứ nhất, nhóm chỉ tiêu về hệ thống đo lường, kiểm tra và phản hồi:

Đo lường là cơ sở để nhà quản lý nhận biết mức độ đạt được của hoạt động khai thác CSVC. Hệ thống chỉ số đo lường cần phản ánh được các phương diện chủ yếu của QLKT CSVC, như tình trạng hoạt động của công trình và thiết bị, mức độ sẵn sàng sử dụng, thời gian gián đoạn, chi phí vận hành và bảo trì, mức độ hoàn thành công việc và sự hài lòng của người sử dụng. Vì vậy, KS1 được xây dựng để đánh giá việc các chỉ số đo lường hiệu quả khai thác CSVC có được xác định rõ ràng hay không [13, 26, 31]. Bên cạnh đó, hoạt động kiểm tra nội bộ cần được tiến hành định kỳ để xác định tình trạng thực tế của CSVC và mức độ tuân thủ các yêu cầu quản lý. Kiểm tra có thể tập trung vào tình trạng kỹ thuật của công trình, việc thực hiện kế hoạch bảo trì, mức độ tuân thủ quy trình vận hành, hồ sơ sửa chữa, tiến độ xử lý công việc và việc sử dụng nguồn lực. Tính định kỳ giúp kiểm tra được thực hiện theo kế hoạch thay vì chỉ được tiến hành khi đã xảy ra hư hỏng hoặc có phản ánh của người sử dụng. Do đó, KS2 phản ánh việc các hoạt động kiểm tra nội bộ về khai thác và bảo trì CSVC có được thực hiện định kỳ hay không [12, 19, 27]. Nguồn thông tin kiểm soát được hình thành từ chỉ số và hoạt động kiểm tra của bộ phận chuyên môn, từ giảng viên, người học, cán bộ và các đơn vị sử dụng là những chủ thể trực tiếp tiếp xúc với CSVC hằng ngày, nên có khả năng phát hiện sớm những hư hỏng, bất tiện hoặc biểu hiện suy giảm chất lượng dịch vụ. KS3 được xây dựng để đánh giá mức độ hoạt động hiệu quả của hệ thống tiếp nhận phản hồi của người sử dụng CSVC [5, 11, 29].

Thứ hai, nhóm chỉ tiêu về phát hiện, khắc phục và phân tích sự cố:

Thông tin đo lường, kiểm tra và phản hồi giúp nhà trường phát hiện sớm hư hỏng, hạn chế gián đoạn và chi phí sửa chữa. Vì vậy, KS4 phản ánh mức độ hư hỏng CSVC được phát hiện kịp thời thông qua kiểm tra định kỳ, theo dõi tình trạng và tiếp nhận phản hồi [7, 22, 27]. Sau khi sự cố được phát hiện, KS5 đánh giá mức độ các biện pháp khắc phục được triển khai kịp thời và hiệu quả. Nội dung này bao gồm xác định mức độ ưu tiên, bố trí nguồn lực, lựa chọn phương án kỹ thuật, tổ chức sửa chữa và kiểm tra kết quả sau khắc phục [7, 15, 30]. KS6 phản ánh mức độ nguyên nhân sự cố được phân tích rõ ràng nhằm phòng tránh tái diễn. Phân tích cần phân biệt biểu hiện, nguyên nhân trực tiếp và nguyên nhân hệ thống, qua đó hỗ trợ điều chỉnh quy trình, chu kỳ bảo trì, đào tạo, thiết bị hoặc trách nhiệm quản lý [8, 16, 28].

Thứ ba, nhóm chỉ tiêu về phản hồi, điều chỉnh và cải tiến:

Kết quả kiểm soát chỉ có giá trị khi được sử dụng để điều chỉnh kế hoạch và quy trình khai thác CSVC. Vì vậy, KS7 phản ánh mức độ kết quả kiểm tra, chỉ số hiệu suất, phản hồi người sử dụng và thông tin sự cố được sử dụng làm căn cứ điều chỉnh kế hoạch hoặc phương thức thực hiện. Chẳng hạn, dữ liệu hư hỏng có thể dẫn đến thay đổi chu kỳ bảo trì, còn phản hồi về không gian có thể làm cơ sở điều chỉnh phương án sử dụng [23, 24]. KS8 phản ánh việc các hành động điều chỉnh và cải tiến sau kiểm soát được thực hiện kịp thời và hiệu quả. Nội dung này bao gồm thay đổi kế hoạch, sửa đổi quy trình, bố trí lại nguồn lực, bổ sung đào tạo hoặc nâng cấp công nghệ. Tính

hiệu quả thể hiện ở khả năng xử lý vấn đề và hạn chế phát sinh sai lệch mới [14, 18, 21]. KS9 phản ánh việc theo dõi và đánh giá hiệu quả sau cải tiến. Việc đánh giá cần dựa trên tiêu chí, dữ liệu trước và sau cải tiến, mức độ đạt mục tiêu và khả năng duy trì kết quả. Chỉ tiêu này thể hiện yêu cầu kiểm chứng kết quả thực tế, qua đó hoàn thiện chu trình kiểm soát [14, 6, 23].

Bảng 3. Hệ thống chỉ tiêu đề xuất mô tả chức năng kiểm soát

STT	Mã CT	Nội dung	Dựa trên nghiên cứu
1	KS1	Các chỉ số đo lường hiệu quả khai thác CSVC được xác định rõ ràng	[13, 26, 31]
2	KS2	Các hoạt động kiểm tra nội bộ về khai thác, bảo trì CSVC được thực hiện	[12, 19, 27]
3	KS3	Hệ thống tiếp nhận phản hồi của người sử dụng CSVC hoạt động hiệu quả	[5, 11, 29]
4	KS4	Các hư hỏng của CSVC được phát hiện kịp thời trong quá trình sử dụng	[7, 22, 27]
5	KS5	Các biện pháp khắc phục sự cố được triển khai kịp thời và hiệu quả	[7, 15, 30]
6	KS6	Các nguyên nhân sự cố được phân tích rõ ràng để phòng tránh tái diễn	[8, 16, 28]
7	KS7	Kết quả kiểm soát được sử dụng để điều chỉnh kế hoạch hoặc quy trình khai thác CSVC	[6, 23, 24]
8	KS8	Các hoạt động điều chỉnh và cải tiến được thực hiện kịp thời, hiệu quả sau kiểm soát	[14, 18, 21]
9	KS9	Kết quả cải tiến sau kiểm soát được giám sát và đánh giá hiệu quả	[14, 6, 23]

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

3.2. Kết quả sàng lọc các chỉ tiêu kiểm soát

Đối với chức năng kiểm soát, kết quả tại Bảng 4 cho thấy chỉ có KS2 đạt ngưỡng chấp nhận. Giá trị giải mờ của KS2 là 0,6865, cao hơn ngưỡng α; 8 chỉ tiêu còn lại có giá trị từ 0,5602 đến 0,6738 và chưa đạt ngưỡng. Như vậy, trong lần sàng lọc này, nội dung được nhóm chuyên gia nhận diện rõ nhất là hoạt động kiểm tra nội bộ định kỳ theo kế hoạch kết hợp với kiểm tra đột xuất khi cần thiết.

Bảng 4. Kết quả Fuzzy Delphi đối với chức năng kiểm soát

Mã	Giá trị giải mờ S_i	Kết quả
KS1	0,5602	Không chấp nhận
KS2	0,6865	Chấp nhận
KS3	0,6560	Không chấp nhận
KS4	0,6594	Không chấp nhận
KS5	0,6594	Không chấp nhận
KS6	0,6678	Không chấp nhận
KS7	0,6738	Không chấp nhận
KS8	0,6678	Không chấp nhận
KS9	0,6702	Không chấp nhận

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ kết quả tính toán Fuzzy Delphi.

4. BÀN LUẬN KẾT QUẢ VÀ HÀM Ý QUẢN LÝ

4.1. Bàn luận kết quả

KS2 đạt ngưỡng cho thấy nhóm chuyên gia đánh giá cao nội dung kiểm soát gắn với hành động cụ thể và bằng chứng qua kế hoạch, biên bản, hồ sơ xử lý. Kết quả phù hợp với nghiên cứu về vai trò của kiểm tra trong nhận diện tình trạng công trình, quản lý bảo trì và đo lường hiệu suất CSVC [25, 26, 27]. Tại các CSGDĐH công lập Việt Nam, kiểm kê, kiểm tra sử dụng tài sản và đối chiếu hồ sơ đã được thể chế hóa. Các báo cáo thực tiễn cho thấy hoạt động này được chú trọng, dù việc cập nhật dữ liệu tại một số đơn vị chưa đầy đủ, kịp thời [1, 2, 3].

Các chỉ tiêu chưa đạt ngưỡng không đồng nghĩa với việc những nội dung này không cần thiết. Kết quả Fuzzy Delphi chỉ phản ánh mức đánh giá tổng hợp của nhóm chuyên gia, không đo lường trực tiếp hiệu quả vận hành của các trường. Các hoạt động trước và trong kiểm tra được nhận diện rõ hơn những nội dung sau kiểm tra như phân tích nguyên nhân, điều chỉnh kế hoạch, thực hiện cải tiến và đánh giá kết quả. Những nội dung này đòi hỏi dữ liệu liên tục, sự phối hợp giữa nhiều đơn vị và cơ chế phản hồi đầy đủ hơn.

Kết quả hàm ý kiểm soát CSVC cần được tổ chức thành chu trình từ kiểm tra, ghi nhận sai lệch và phân công xử lý đến xác nhận kết quả. Mỗi phát hiện cần gắn với trách nhiệm, thời hạn khắc phục và bằng chứng hoàn thành. Phân tích nguyên nhân và đánh giá sau khắc phục giúp tạo thông tin phục vụ điều chỉnh hoạt động quản lý.

4.2. Hàm ý quản lý

Kết quả nghiên cứu trước hết cho thấy các CSGDĐH công lập cần củng cố hoạt động kiểm tra nội bộ. Nhà trường nên xây dựng kế hoạch kiểm tra hằng năm, xác định rõ đối tượng, tiêu chí, đơn vị thực hiện và bằng chứng cần thu thập; đồng thời kết hợp kiểm tra định kỳ với kiểm tra đột xuất dựa trên mức độ rủi ro. Nội dung kiểm tra cần tập trung vào tình trạng kỹ thuật, an toàn, việc tuân thủ quy trình vận hành, bảo trì và tiến độ xử lý sự cố.

Để kiểm tra không mang tính hình thức, mỗi phát hiện cần được ghi nhận, phân loại theo mức độ ảnh hưởng và gắn với đơn vị chịu trách nhiệm, biện pháp xử lý, thời hạn hoàn thành và bằng chứng xác nhận. Đối với các sự cố lặp lại hoặc có ảnh hưởng lớn, cần phân tích nguyên nhân liên quan đến kỹ thuật, con người, quy trình và tổ chức, qua đó hạn chế việc chỉ khắc phục biểu hiện mà chưa xử lý nguyên nhân.

Bên cạnh đó, dữ liệu phục vụ kiểm soát cần được chuẩn hóa và cập nhật thống nhất. Hệ thống thông tin tối thiểu phải theo dõi mã tài sản, vị trí, tình trạng, lịch sử bảo trì - sửa chữa, thời gian gián đoạn, chi phí và trạng thái xử lý. Việc ứng dụng phần mềm chỉ phát huy hiệu quả khi đi kèm quy tắc nhập liệu, phân quyền, kiểm tra chéo và trách nhiệm cập nhật rõ ràng.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất và sàng lọc 9 chỉ tiêu mô tả chức năng kiểm soát trong QLKT CSVC tại các CSGDĐH công lập, thuộc ba nhóm: Đo lường, kiểm tra và phản hồi; phát hiện, khắc phục và phân tích sự cố; phản hồi, điều chỉnh và cải tiến. Kết quả Fuzzy Delphi từ 12 chuyên gia cho thấy KS2 về kiểm tra nội bộ định kỳ và đột xuất là chỉ tiêu duy nhất đạt ngưỡng lựa chọn. Kết quả phản ánh kiểm tra nội bộ là nội dung được nhận diện rõ nhất trong chức năng kiểm soát, phù hợp với đặc điểm quản lý tài sản công và yêu cầu bảo đảm trách nhiệm tại các CSGDĐH công lập Việt Nam. Các chỉ tiêu còn lại chưa đạt ngưỡng trong lần sàng lọc này, nhưng điều đó không phủ nhận vai trò của phản hồi, phân tích nguyên nhân, điều chỉnh và đánh giá cải

tiến trong quá trình quản lý. Nghiên cứu cung cấp căn cứ khoa học cho việc nhận diện nội dung trọng tâm và hoàn thiện hoạt động kiểm soát trong QLKT CSVC.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Giáo dục và Đào tạo. Báo cáo tình hình quản lý, sử dụng tài sản công năm 2025, Hà Nội, 2026.

[2] Đại học Cần Thơ. Báo cáo tình hình quản lý, sử dụng tài sản công năm 2025. Công văn số 564/ĐHCT-CSVC&DA, ngày 26/02/2026.

[3] Trường Đại học Mở TP Hồ Chí Minh. Báo cáo tình hình quản lý, sử dụng tài sản công năm 2025. Báo cáo số 489/BC-ĐHM, ngày 26/02/2026.

[4] Trường Đại học Sư phạm Thể dục Thể thao TP Hồ Chí Minh. Báo cáo về việc sử dụng tài sản công và phối hợp khai thác CSVC với Trường Đại học Mở TP Hồ Chí Minh, 2026.

[5] A.Parasuraman, V.A.Zeithaml and L.L.Berry. SERVQUAL: a multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. Journal of Retailing, vol. 64, no. 1, pp. 12-40, 1988.

[6] A.Neely, M.Gregory and K.Platts. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management, vol.15, no. 4, pp. 80-116, 1995, doi: 10.1108/01443579510083622.

[7] B.S.Dhillon. Maintainability, maintenance and reliability for engineers. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2006.

[8] B.Andersen and T.Fagerhaug. Root cause analysis: simplified tools and techniques, 2nd ed. ASQ Quality Press, Milwaukee, WI, USA, 2006.

[9] C.-C. Hsu and B. A. Sandford. The Delphi technique: making sense of consensus. Practical Assessment, Research & Evaluation, vol. 12, no. 10, pp. 1-8, 2007, doi: 10.7275/pdz9-th90.

[10] C.Okoli and S.D.Pawlowski. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Information & Management, vol. 42, no. 1, pp. 15-29, 2004, doi: 10.1016/j.im.2003.11.002.

[11] C.Grönroos. Service management and marketing: customer management in service competition, 3rd ed. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2007.

[12] Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission. Internal control Integrated framework: framework and appendices, May 2013.

[13] D.Amos, Z.N.Musa and C.P.Au-Yong. A review of facilities management performance measurement. Property Management, vol. 37, no. 4, pp. 490-511, 2019, doi: 10.1108/PM-08-2018-0051.

[14] D.J.Teece, M.Peteraf and S.Leih. Dynamic capabilities and organizational agility: risk, uncertainty and strategy in the innovation economy. California Management Review, vol. 58, no. 4, pp. 13-35, 2016, doi: 10.1525/cmr.2016.58.4.13.

[15] D.Palmer. Maintenance planning and scheduling handbook, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2006.

[16] D.Okes. Root cause analysis: the core of problem solving and corrective action, 2nd ed. ASQ Quality Press, Milwaukee, WI, USA, 2019.

[17] I.R.Diamond et al. Defining consensus: a systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies. Journal of Clinical Epidemiology, vol. 67, no. 4, pp. 401-409, 2014, doi: 10.1016/j.jclinepi.2013.12.002.

[18] J.S.Oakland. Total quality management and operational excellence: text with cases, 4th ed. Routledge, Abingdon, UK, 2014.

[19] K.H.S.Pickett. The internal auditing handbook, 3rd ed. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2010.

[20] M.A.Kamarazaly, J.Mbachu and R.Phipps. Challenges faced by facilities managers in the Australasian universities. Journal of Facilities Management, vol. 11, no. 2, pp. 136-151, 2013, doi:10.1108/14725961311319755.

[21] N.Bhuiyan and A.Baghel. An overview of continuous improvement: from the past to the present. Management Decision, vol. 43, no. 5, pp. 761-771, 2005, doi:10.1108/00251740510597761.

[22] R.K.Mobley. An introduction to predictive maintenance, 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2002.

[23] R.N.Anthony, V.Govindarajan, F.G.H.Hartmann, K.Kraus and G.Nilsson. Management control systems, 1st European ed. McGraw-Hill Education, Maidenhead, UK, 2014.

[24] R.N.Anthony. Planning and control systems: a framework for analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, Boston, MA, USA, 1965.

[25] S.Lavy. Facility management practices in higher education buildings: a case study. Journal of Facilities Management, vol. 6, no. 4, pp. 303-315, 2008, doi:10.1108/14725960810908163.

[26] S.Lavy, J.A.Garcia and M.K.Dixit. Establishment of KPIs for facility performance measurement: review of literature. Facilities, vol. 28, no. 9/10, pp. 440-464, 2010, doi:10.1108/02632771011057189.

[27] S.M.Cardinal, C.E.Tosin, S.E.Pilz and M.F.Costella. Inspection method for building maintenance management in higher education institutions. Journal of Performance of Constructed Facilities, vol.34, no.6, Art. no. 04020112, 2020, doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001521.

[28] S.Dekker. The field guide to understanding 'human error', 3rd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2017.

[29] S.O.Oladokun and C.A.Ajayi. Assessing users' perception of facilities management services in a public university: a case study approach. Journal of Facility Management Education and Research, vol. 2, no. 2, pp. 62-73, 2018.

[30] T.Wireman. Benchmarking best practices in maintenance management. Industrial Press, New York, NY, USA, 2004.

[31] Y.Kim, M.S.Kim and J.H.Kim. Development of key performance indicators for the improvement of university facility management services in Korea. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 313-320, 2018, doi:10.3130/jaabe.17.313.

[32] Trường Đại học Luật TP Hồ Chí Minh. Báo cáo tình hình quản lý, sử dụng tài sản công năm 2025. TP Hồ Chí Minh, 2026.

■ Ngày nộp bài: 26/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 04/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 18/9/2026

Nghiên cứu mô hình quản lý đường sắt đô thị gắn với phát triển TOD của Thủ đô Hà Nội đến năm 2035, tầm nhìn đến năm 2045

Research on the urban railway management model integrated with TOD development in Hanoi Capital: Period up to 2035, with a vision to 2045

> THS.NCS VŨ QUANG ANH
Cục Đường sắt Việt Nam
Email: vuquanganh3010@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu mô hình quản lý đường sắt đô thị (ĐSĐT) gắn với phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) của Thủ đô Hà Nội trong bối cảnh khung pháp lý mới mở rộng phân cấp, huy động nguồn lực đất đai và áp dụng cơ chế đặc thù. Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích văn bản pháp luật, phân tích thể chế, tham khảo kinh nghiệm từ Hồng Kông, Quảng Châu và Trùng Khánh. Kết quả cho thấy mô hình hiện hành phù hợp với giai đoạn phát triển từng tuyến nhưng còn phân tán giữa quản lý nhà nước, chủ đầu tư, doanh nghiệp vận hành và khai thác giá trị gia tăng tại khu vực TOD. Bài báo đề xuất mô hình hai tầng: Một đầu mối quản lý nhà nước được phân cấp, ủy quyền rõ ràng và một doanh nghiệp nhà nước đa chức năng hình thành theo lộ trình từ kiện toàn Ban Quản lý ĐSĐT Hà Nội đến hợp nhất năng lực đầu tư, vận hành và khai thác TOD. Mô hình cần đi kèm cơ chế kiểm soát quyền lực, hạch toán minh bạch, quản lý tài sản theo vòng đời và bộ chỉ tiêu đánh giá kết quả.

Từ khóa: Đường sắt đô thị; mô hình quản lý; TOD; thu hồi giá trị gia tăng từ đất; Hà Nội.

ABSTRACT

This paper examines the urban railway management model integrated with Transit-Oriented Development (TOD) in Hanoi, set against a backdrop of a new legal framework that expands decentralization, mobilizes land resources, and applies special mechanisms. The study employs methods including legal document analysis, institutional analysis, model comparison and the synthesis of experiences from Hong Kong, Guangzhou and Chongqing. The findings indicate that while the current model suits the phased development of individual lines, management responsibilities remain fragmented across state authorities, project investors, operating entities and value-capture activities within TOD areas. The paper proposes a two-tier model: a state management entity with clearly defined decentralization and delegation of authority and a multi-functional state-owned enterprise established through a roadmap that evolves from consolidating the Hanoi Urban Railway Management Board to integrating capabilities for investment, operation and TOD value exploitation. This model requires accompanying mechanisms for power oversight, transparent accounting, lifecycle asset management and a performance evaluation framework.

Keywords: Urban railway; management model; transit-oriented development; land-value capture; Hanoi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quán triệt định hướng chiến lược của Bộ Chính trị, Quốc hội đã hoàn thiện khung thể chế đặc thù, tạo hành lang pháp lý để Hà Nội phát triển mạng lưới ĐSĐT. Mạng lưới ĐSĐT của Hà Nội được quy hoạch 18 tuyến với tổng chiều dài khoảng 979 km (lên 1.200 km khi kết nối liên vùng). Theo đó, giai đoạn 2026 - 2035 sẽ hoàn thành khoảng 500 km và giai đoạn 2036 - 2045 sẽ hoàn thành khoảng 479 km còn lại.

Mạng lưới ĐSĐT Thủ đô được hoạch định tối ưu theo mô hình TOD. Mô hình này hướng tới việc hình thành các tổ hợp đô thị nén đa chức năng tại khu vực nhà ga, đề-pô, gắn với khai thác hiệu quả không gian ngầm và trên cao. Nguồn lực đầu tư được huy động đa dạng và bền vững: Ngân sách Trung ương kết hợp ngân sách địa phương, trái phiếu chính quyền và vốn vay hợp pháp. Đặc biệt, Hà Nội được áp dụng cơ chế đặc thù giữ lại 100% nguồn thu từ công

cụ thu hồi giá trị gia tăng từ đất (LVC) tại các khu vực TOD để trực tiếp tái đầu tư.

Để hoàn thành khối lượng hạ tầng lớn với thách thức rất lớn về mặt tiến độ và nguồn lực, việc nghiên cứu và đề xuất định hướng mô hình quản lý ĐSĐT Hà Nội mang tính cấp thiết, không chỉ xuất phát từ yêu cầu thực tiễn mà còn nhằm cụ thể hóa các chủ trương, đường lối của Đảng đã được khẳng định tại Văn kiện Đại hội đại biểu toàn quốc lần thứ XIV.

2. PHƯƠNG PHÁP VÀ KHUNG PHÂN TÍCH

Nghiên cứu tập trung vào quan hệ giữa thiết kế thể chế, phân bổ thẩm quyền và hiệu quả tổ chức thực hiện dự án ĐSĐT gắn với TOD. Nguồn dữ liệu gồm các nghị quyết, luật và đề án có liên quan; tài liệu của các cơ quan quản lý, tổ chức phát triển và doanh nghiệp ĐSĐT; cùng các nghiên cứu về mô hình Rail + Property, quản trị vận tải đô thị và quản lý tài sản theo vòng đời. Các văn bản được phân tích theo bốn nhóm chức năng: Quản lý nhà nước; chuẩn bị và thực hiện đầu tư; vận hành - bảo trì; khai thác đất đai, không gian và dịch vụ tại khu vực TOD.

Phương pháp phân tích thể chế được dùng để xác định chủ thể, thẩm quyền, trách nhiệm giải trình và các điểm giao thoa giữa quy hoạch, đất đai, tài chính và đầu tư. Phương pháp so sánh trường hợp điển hình được áp dụng đối với Hồng Kông, Trùng Khánh và Quảng Châu nhằm nhận diện điều kiện tạo nên hiệu quả phối hợp và cơ chế tài chính nội sinh. Việc lựa chọn trường hợp không nhằm sao chép mô hình tổ chức mà để rút ra nguyên tắc có thể điều chỉnh phù hợp với chế độ sở hữu đất đai, pháp luật doanh nghiệp nhà nước và cơ cấu chính quyền đô thị của Hà Nội.

3. CƠ SỞ PHÁP LÝ VÀ YÊU CẦU ĐỐI VỚI MÔ HÌNH QUẢN LÝ

3.1. Quản lý nhà nước về ĐSĐT

Khung pháp lý mới xác lập nguyên tắc phân quyền mạnh hơn cho Hà Nội trong phát triển ĐSĐT, đồng thời yêu cầu quản lý dựa trên tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật, kiểm tra và giám sát kết quả. ĐSĐT là đường sắt địa phương phục vụ vận tải hành khách đô thị; do đó, UBND Thành phố chịu trách nhiệm tổ chức đầu tư, quản lý và khai thác trên địa bàn theo thẩm quyền. Thành phố được quyết định hoặc triển khai nhiều thủ tục đầu tư theo cơ chế đặc thù, qua đó giảm tầng nấc phê duyệt và tạo điều kiện xử lý đồng thời dự án tuyến, giải phóng mặt bằng và TOD.

Phân quyền làm tăng tính chủ động nhưng cũng chuyển phần lớn trách nhiệm về cấp thành phố. Khi số lượng dự án tăng nhanh, cơ quan quản lý phải có năng lực ban hành quy định thuộc thẩm quyền, kiểm soát an toàn, quản lý phương tiện và người lái, theo dõi tài sản, tích hợp mạng lưới và giám sát doanh nghiệp. Vì vậy, mô hình tổ chức cần một đầu mối chuyên ngành đủ năng lực, song vẫn giữ nguyên nguyên tắc phân định giữa cơ quan quản lý nhà nước với chủ đầu tư và doanh nghiệp cung ứng dịch vụ.

3.2. Phát triển đô thị theo mô hình TOD

Cơ chế TOD được hình thành trên ba nhóm công cụ: Tạo quỹ đất sạch; quy hoạch không gian tích hợp và thu hồi một phần giá trị gia tăng từ đất. Thành phố có thể tổ chức thu hồi đất vùng phụ cận nhà ga, đề-pô đồng thời với đất xây dựng tuyến; tách bồi thường, hỗ trợ, tái định cư thành dự án độc lập và chuẩn bị nguồn vốn cho giải phóng mặt bằng, di dời hạ tầng trước khi dự án chính được quyết định đầu tư. Cách tiếp cận này cho phép giảm độ trễ giữa xây dựng kết cấu hạ tầng và chuẩn bị khu vực TOD.

Về quy hoạch, các chỉ tiêu sử dụng đất và tổ chức không gian tại khu vực TOD có thể được quyết định phù hợp với năng lực hạ tầng; việc khai thác không gian ngầm, trên cao và vùng phụ cận được đặt trong một cấu trúc tích hợp. Về tài chính, nguồn thu từ đất, diện tích sàn tăng thêm, cải thiện hạ tầng, kết nối giao thông và kinh doanh dịch vụ có thể được huy động để tái đầu tư cho ĐSĐT. Tuy nhiên, hiệu quả LVC chỉ hình thành khi quy hoạch, giải phóng mặt bằng và đấu giá hoặc lựa chọn nhà đầu tư được chuẩn bị sớm, minh bạch và gắn với tiến độ xây dựng hạ tầng.

3.3. Cơ sở kiện toàn tổ chức quản lý ĐSĐT

HĐND Thành phố có thẩm quyền xem xét tổ chức lại cơ quan chuyên trách, bố trí biên chế và chính sách nhân lực; UBND Thành phố chịu trách nhiệm tái cơ cấu quản lý, bảo trì kết cấu hạ tầng ĐSĐT và kiện toàn tổ chức quản lý dự án. Thành phố đồng thời thực hiện một số nhiệm vụ chuyên ngành được phân cấp như đăng ký phương tiện, sát hạch và cấp giấy phép lái tàu ĐSĐT. Những nhiệm vụ này đòi hỏi năng lực kỹ thuật độc lập với doanh nghiệp vận hành.

Đối với tài sản kết cấu hạ tầng ĐSĐT do Nhà nước đầu tư, UBND Thành phố thực hiện vai trò đại diện chủ sở hữu và quyết định phương thức giao quản lý hoặc khai thác theo pháp luật. Khung pháp lý cũng cho phép thu hút chuyên gia và đào tạo nhân lực chuyên sâu. Như vậy, điều kiện pháp lý để kiện toàn mô hình đã tương đối rõ, vấn đề cốt lõi là thiết kế cơ chế phối hợp và trách nhiệm giải trình, không chỉ thay đổi sơ đồ tổ chức.

4. THỰC TRẠNG MÔ HÌNH QUẢN LÝ ĐSĐT HÀ NỘI

4.1. Chủ thể quản lý nhà nước

HĐND Thành phố quyết định cân đối, bố trí vốn đầu tư công trung hạn và hằng năm từ ngân sách địa phương; quy định chi tiết các nội dung được giao về TOD; điều chỉnh, bổ sung danh mục dự án ĐSĐT theo nhu cầu phát triển và giám sát việc thực hiện các cơ chế đặc thù. UBND Thành phố thống nhất điều hành quy hoạch, đầu tư và quản lý tài sản kết cấu hạ tầng ĐSĐT. Các sở chuyên môn và chính quyền địa phương nơi tuyến đi qua thực hiện nhiệm vụ tham mưu, thẩm định, quản lý đất đai, xây dựng, giao thông, tài chính và tổ chức thực hiện theo phân công.

4.2. Chủ đầu tư, đơn vị vận hành và bảo trì

Ban Quản lý ĐSĐT Hà Nội (MRB) là đơn vị sự nghiệp công lập trực thuộc UBND Thành phố, được giao làm chủ đầu tư các dự án ĐSĐT theo pháp luật về xây dựng. Công ty TNHH MTV Đường sắt Hà Nội (Hanoi Metro) là doanh nghiệp 100% vốn nhà nước, trực tiếp vận hành, khai thác và bảo trì các tuyến do Nhà nước đầu tư. Hoạt động cung ứng dịch vụ vận tải công cộng được thực hiện thông qua cơ chế đặt hàng theo quy định. Cách bố trí này tạo sự chuyên môn hóa giữa đầu tư xây dựng và khai thác vận tải, nhưng chưa hình thành chủ thể chịu trách nhiệm thống nhất về hiệu quả tài sản trong toàn bộ vòng đời.

4.3. Những hạn chế chủ yếu

Dưới góc nhìn quản trị công kết hợp định hướng TOD và quản lý tài sản theo vòng đời (LCAM), mô hình quản lý ĐSĐT hiện hành của Hà Nội đã hoàn thành tốt vai trò ở giai đoạn thí điểm từng tuyến riêng lẻ. Tuy nhiên, mô hình này bắt đầu bộc lộ hạn chế khi triển khai dự án ĐSĐT theo mô hình TOD đòi hỏi tính đồng bộ cao về thời gian và cơ chế tuần hoàn tài chính nội sinh.

"Điểm nghẽn" lớn nhất trong khâu lập dự án hiện nay là độ trễ giữa tiến độ lập quy hoạch chi tiết khu vực TOD (tỷ lệ 1/500) với quy hoạch tuyến và nhà ga để triển khai đồng thời dự án ĐSĐT theo mô hình TOD. Sự lệch pha này xuất phát từ việc thiếu một cơ quan đầu mối đủ thẩm quyền bao trùm để chủ động chuẩn bị đồng bộ 4 yếu tố then chốt: Quy hoạch - Tài chính - Đất đai - Đầu tư, dẫn đến hệ quả khu vực TOD bị triển khai sau tuyến ĐSĐT.

Thực trạng trên làm kéo dài tiến độ dự án và triệt tiêu năng lực tự chủ tài chính của mô hình TOD. Cụ thể, việc chậm trễ không chỉ làm gia tăng mạnh chi phí giải phóng mặt bằng khu vực TOD (do

giá đất tăng theo sức hút của tuyến ĐSĐT), làm chậm nhịp và giảm sút hiệu quả khai thác nguồn thu địa tô chênh lệch, mà còn làm chậm đi cơ hội giảm gánh nặng ngân sách trong đầu tư và bảo trì toàn vòng đời dự án (điển hình như tuyến số 2.1 Nam Thăng Long - Trần Hưng Đạo hay tuyến 2A kéo dài Yên Nghĩa - Xuân Mai đang nghiên cứu).

5. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ GIÁ TRỊ THAM KHẢO

5.1. Hồng Kông

MTR Corporation phát triển mô hình "Đường sắt + Bất động sản" (R+P), kết hợp xây dựng, vận hành đường sắt với phát triển và khai thác thương mại tại các khu đất quanh ga. Quyền phát triển được xác định trong khuôn khổ của chính quyền; MTR hợp tác với khu vực tư nhân và sử dụng phần giá trị tạo ra để hỗ trợ chi phí đường sắt. Kinh nghiệm này cho thấy TOD có thể tạo nguồn thu ngoài vé đáng kể, nhưng phụ thuộc vào quyền phát triển rõ ràng, năng lực quản trị dự án và kỷ luật tài chính.

5.2. Quảng Châu

Tập đoàn Metro Quảng Châu tham gia chuỗi hoạt động từ đầu tư xây dựng đến vận hành, bảo trì, phát triển bất động sản và khai thác thương mại. Mức độ tích hợp cao giúp giảm chi phí vận hành và tạo điều kiện chuẩn hóa hệ thống. Tuy nhiên, giá trị tham khảo không nằm ở việc doanh nghiệp kiêm nhiệm mọi vai trò, mà ở cơ chế giao nhiệm vụ ổn định, phối hợp quy hoạch sớm và sử dụng nguồn thu thương mại để hỗ trợ phát triển mạng lưới.

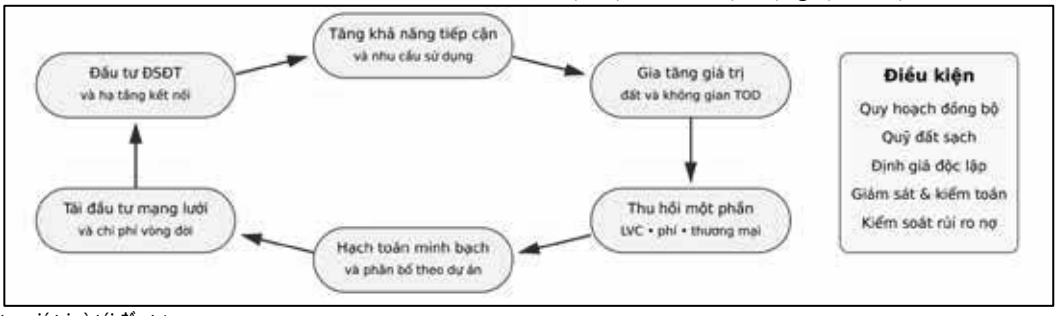
5.3. Trùng Khánh

Trùng Khánh áp dụng quy hoạch chuyên biệt cho khu vực TOD, phân định chủ thể phát triển phần giao thông và phần đất ngoài phạm vi công trình, đưa chi phí thu hồi đất và di dời hạ tầng vào kế hoạch phát triển, đồng thời thiết lập cơ chế điều phối cấp thành phố. Trường hợp ga Shapingba cho thấy một đầu mối điều phối mạnh có thể rút ngắn thời gian xử lý vướng mắc giữa đường sắt, đất đai và đô thị, song hoạt động khai thác đất vẫn cần phân định trách nhiệm và lựa chọn chủ thể theo cơ chế phù hợp.

5.4. Bài học đối với Hà Nội

Kinh nghiệm quốc tế gợi mở ba định hướng: Thiết lập cơ quan điều phối chuyên trách đủ thẩm quyền; chuẩn bị quỹ đất và quy hoạch TOD đồng thời với tuyến và hình thành doanh nghiệp có năng lực tích hợp đầu tư, vận hành, bảo trì và khai thác thương mại. Mô hình R+P có thể được vận dụng có chọn lọc để tạo dòng vốn nội sinh, nhưng phải phù hợp với pháp luật đất đai, quản lý vốn nhà nước và cơ chế đấu giá, đấu thầu của Việt Nam.

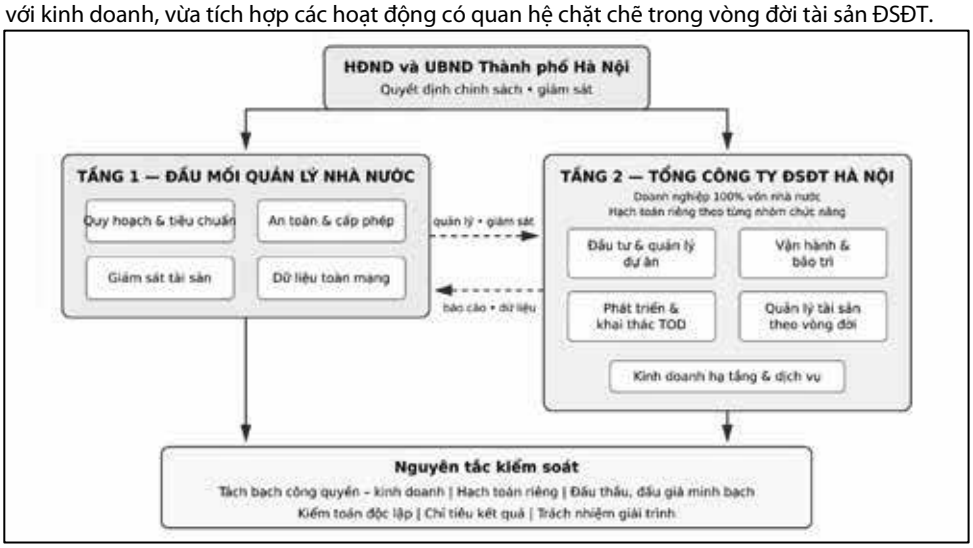
Các trường hợp trên cho thấy hiệu quả của mô hình tích hợp phụ thuộc vào ba điều kiện. Thứ nhất, chủ thể phát triển phải được giao quyền tiếp cận và khai thác quỹ đất theo cơ chế minh bạch, ổn định và gắn với nghĩa vụ đầu tư hạ tầng. Thứ hai, dòng tiền từ bất động sản và dịch vụ phải được hạch toán riêng, kiểm toán và tái đầu tư theo mục tiêu đã xác định; nếu thiếu kỷ luật tài chính, mô hình đa chức năng có thể chuyển rủi ro đất đai sang khu vực công. Thứ ba, quyền lực tập trung cần đi cùng cơ chế giám sát độc lập, công khai chỉ tiêu hiệu quả và phân định rõ hoạt động công ích với hoạt động kinh doanh. Đây là những điều kiện phải được nội luật hóa khi vận dụng tại Hà Nội.



Hình 1. Chu trình tạo giá trị và tái đầu tư

6. ĐỊNH HƯỚNG MÔ HÌNH QUẢN LÝ ĐẾN NĂM 2035, TẦM NHÌN ĐẾN NĂM 2045

Từ khung pháp lý mới, phân tích thực trạng và kinh nghiệm quốc tế, bài báo đề xuất mô hình hai tầng, bảo đảm vừa tách bạch chức năng quản lý nhà nước với kinh doanh, vừa tích hợp các hoạt động có quan hệ chặt chẽ trong vòng đời tài sản ĐSĐT.



Hình 2. Mô hình quản lý ĐSĐT hai tầng gắn với TOD

6.1. Tầng quản lý nhà nước

Tiếp tục duy trì hệ thống các cơ quan chuyên môn thực hiện chức năng quản lý nhà nước theo luật định; không chuyển các quyền ban hành quy chuẩn, cấp phép, thanh tra, kiểm tra và quyết định chính sách cho doanh nghiệp. Đồng thời, nghiên cứu tổ chức có kiểm soát cho một cơ quan đầu mối thuộc UBND Thành phố đủ mạnh để điều phối chuyên ngành ĐSĐT, bảo đảm đủ năng lực tổng hợp quy hoạch, tiêu chuẩn kỹ thuật, an toàn vận hành, quản lý tài sản và dữ liệu toàn mạng lưới. Cơ quan này chịu trách nhiệm theo dõi tiến độ tổng thể, xử lý vướng mắc giữa các dự án, đề xuất danh mục ưu tiên và công khai bộ chỉ tiêu kết quả.

6.2. Tầng đầu tư, vận hành và khai thác TOD

6.2.1. Giai đoạn 2026 - 2028: Kiện toàn MRB

Mục tiêu của giai đoạn đầu là tập trung nguồn lực hoàn thiện các dự án đang triển khai và chuẩn bị nền tảng pháp lý, dữ liệu, nhân lực cho mô hình tích hợp. MRB cần được kiện toàn cơ cấu, bổ sung nhân sự về quy hoạch TOD, tài chính đất đai, hợp đồng, quản trị tài sản và hệ thống, đồng thời nâng cao năng lực quản lý dự án theo chuẩn quốc tế. Nhiệm vụ chuẩn bị quy hoạch vùng phụ cận, xác định danh mục quỹ đất, dự báo dòng tiền LVC và kế hoạch khai thác thương mại phải được thực hiện đồng thời với nghiên cứu tiền khả thi và nghiên cứu khả thi của dự án.

6.2.2. Giai đoạn 2028 - 2030: Hình thành Tổng công ty ĐSĐT Hà Nội

Trên cơ sở đánh giá kết quả giai đoạn một, nghiên cứu hợp nhất năng lực của MRB và Hanoi Metro để hình thành Tổng công ty ĐSĐT Hà Nội do Nhà nước nắm giữ 100% vốn điều lệ, trực thuộc UBND Thành phố. Tổng công ty hoạt động theo mô hình đa chức năng nhưng phải tổ chức các đơn vị hạch toán riêng đối với đầu tư xây dựng, vận hành công ích, bảo trì tài sản, phát triển TOD và kinh doanh dịch vụ. Việc hợp nhất chỉ thực hiện khi có đề án xử lý đầy đủ tài sản, lao động, hợp đồng, nghĩa vụ tài chính và cơ chế đặt hàng dịch vụ công.

Các nhóm chức năng chủ yếu gồm: Làm chủ đầu tư hoặc quản lý dự án ĐSĐT theo giao nhiệm vụ; tổ chức vận hành và bảo trì; kinh doanh hạ tầng, quảng cáo và dịch vụ; tham gia phát triển, khai thác quỹ đất và không gian đô thị tại khu vực TOD theo quy hoạch và cơ chế cạnh tranh; quản lý dữ liệu và tài sản theo vòng đời; sử dụng phần lợi nhuận được phép giữ lại để tái đầu tư mạng lưới. Tổng công ty không thực hiện chức năng quản lý nhà nước, không tự phê duyệt quy hoạch hoặc tự giao đất và không được mặc nhiên độc quyền các hoạt động có thể tổ chức đấu thầu, đấu giá.

6.3. Cơ chế tài chính và quản trị rủi ro

Nguồn thu từ TOD cần được quản lý theo nguyên tắc truy xuất được nguồn hình thành, chi phí tạo lập quỹ đất và phần giá trị tăng thêm do đầu tư công mang lại. Thành phố có thể thiết lập tài khoản hoặc quỹ theo quy định để tiếp nhận nguồn thu từ đấu giá đất, diện tích sàn tăng thêm, phí cải thiện hạ tầng, phí kết nối và khai thác thương mại; việc sử dụng nguồn thu phải gắn với danh mục dự án và kế hoạch tài chính trung hạn. Không nên coi doanh thu đất đai là nguồn ổn định để bù đắp mọi chi phí vận hành, bởi dòng tiền này phụ thuộc chu kỳ thị trường và môi trường pháp lý.

6.4. Bộ chỉ tiêu theo dõi thực hiện

Mô hình mới cần được đánh giá bằng kết quả thay vì chỉ bằng việc hoàn thành tái cơ cấu. Nhóm chỉ tiêu tiến độ gồm thời gian chuẩn bị dự án, tỷ lệ mốc tích hợp quy hoạch TOD hoàn thành đồng thời với kết cấu hạ tầng tuyến và thời gian bàn giao đưa vào khai thác. Nhóm chỉ tiêu vận hành gồm độ sẵn sàng, đúng giờ, an toàn, sản lượng hành khách và chi phí trên đơn vị vận chuyển. Nhóm chỉ tiêu tài chính gồm tỷ lệ thu ngoài vé, mức thu hồi giá trị đất, nghĩa vụ nợ và nhu cầu trợ giá. Nhóm chỉ tiêu quản trị gồm mức độ công khai, kết quả kiểm toán, thời gian xử lý giao diện liên ngành và chất lượng dữ liệu tài sản.

7. THẢO LUẬN

Ưu điểm chính của mô hình đề xuất là tạo một chuỗi trách nhiệm liên tục từ chuẩn bị dự án đến vận hành và khai thác giá trị gia tăng, qua đó giảm tình trạng tối ưu cục bộ theo từng khâu. Tuy nhiên, hợp nhất tổ chức không tự động tạo ra hiệu quả. Nếu thiếu cơ chế quản trị doanh nghiệp, năng lực chuyên môn và dữ liệu chuẩn, một tổ chức lớn hơn có thể làm tăng tính quan liêu và che mờ trách nhiệm. Vì vậy, lộ trình hai giai đoạn và điều kiện đánh giá trước hợp nhất là cần thiết.

Đề xuất cũng cần được xem xét trong giới hạn của nghiên cứu. Phân tích chủ yếu dựa trên văn bản và trường hợp điển hình, chưa lượng hóa đầy đủ chi phí chuyển đổi, giá trị đất có thể thu hồi và tác động đến ngân sách theo từng kịch bản. Các nghiên cứu tiếp theo nên xây dựng mô hình tài chính cho một số khu vực TOD đại diện; đánh giá phương án pháp lý đối với tài sản, vốn và lao động khi hợp nhất; đồng thời khảo sát ý kiến cơ quan quản lý, doanh nghiệp, nhà đầu tư và cộng đồng. Kết quả định lượng sẽ giúp lựa chọn chính xác thời điểm, quy mô và hình thức tổ chức của Tổng công ty.

8. KẾT LUẬN

Phát triển mạng lưới ĐSĐT gắn với TOD đòi hỏi Hà Nội chuyển từ quản lý theo từng dự án, từng tuyến sang quản trị hệ thống và tài sản theo vòng đời. Khung pháp lý mới tạo điều kiện phân cấp, huy động nguồn lực đất đai và tổ chức thí điểm, nhưng hiệu quả phụ thuộc vào năng lực chuyển hóa các cơ chế này thành quy trình phối hợp, dữ liệu, nhân lực và trách nhiệm giải trình cụ thể. Mô hình hai tầng gồm đầu mối quản lý nhà nước và doanh nghiệp nhà nước đa chức năng có thể khắc phục sự phân mảnh, với điều kiện chức năng công quyền và kinh doanh được tách bạch.

Trong ngắn hạn, ưu tiên là kiện toàn MRB, thiết lập phối hợp vòng đời với Hanoi Metro và tích hợp quy hoạch TOD ngay từ bước chuẩn bị dự án. Sau khi đáp ứng các điều kiện về pháp lý, tài sản, nhân lực và quản trị, Thành phố có thể xem xét thành lập Tổng công ty ĐSĐT Hà Nội để tích hợp đầu tư, vận hành - bảo trì và khai thác TOD. Việc triển khai phải gắn với hạch toán minh bạch, kiểm soát rủi ro đất đai, bộ chỉ tiêu kết quả và giám sát độc lập. Đây là nền tảng để rút ngắn tiến độ, nâng cao hiệu quả tài sản và tạo chu trình tài chính bền vững hơn cho mạng lưới đến năm 2035, tầm nhìn đến năm 2045.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Đường sắt số 95/2025/QH15 ngày 27/6/2025, 2025.

[2] Quốc hội. Luật Thủ đô số 02/2026/QH16 ngày 23/4/2026, 2026.

[3] Quốc hội. Nghị quyết số 188/2025/QH15 ngày 19/02/2025 thí điểm một số cơ chế, chính sách đặc thù, đặc biệt để phát triển hệ thống mạng lưới ĐSĐT tại thành phố Hà Nội, Thành phố Hồ Chí Minh, 2025.

[4] Quốc hội. Nghị quyết số 258/2025/QH15 ngày 11/12/2025 về thí điểm một số cơ chế, chính sách đặc thù để thực hiện các dự án lớn, quan trọng trên địa bàn Thủ đô, 2025.

[5] JICA. The Technical Assistance Project to Strengthen the Capacity of Regulator and to Establish Operation and Maintenance Company of Metropolitan Railway Lines in Hanoi City, 2016.

[6] Sock Yong Phang, Bin Chye Tan. Sustainable strategies for Mass Rapid Transit PPPs, Singapore Management University, 2022.

■ Ngày nộp bài: 05/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 14/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 02/10/2026

Nghiên cứu tổng quan các chiến lược giảm thiểu phát thải và bài học cho ngành Xây dựng Việt Nam

A literature review of emission mitigation strategies and lessons for the Vietnamese Construction sector

> THS TRẦN ĐỨC ĐẠT[1], TS ĐỖ VĂN THUẬN[1,*], PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI[2]
[1]Học viện Chiến lược, bồi dưỡng cán bộ xây dựng
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: thuanqlcb@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo hệ thống hóa các kết quả nghiên cứu quốc tế về chiến lược giảm nhẹ phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực xây dựng nhằm rút ra bài học cho Việt Nam trong bối cảnh thực hiện cam kết phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050. Phương pháp tổng quan tích hợp được áp dụng cho 29 tài liệu công bố giai đoạn 2008 - 2025, phân thành 5 hướng: Phát thải tiềm ẩn và đánh giá vòng đời; hiệu quả năng lượng vận hành; vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn; thiết kế thụ động; công cụ kinh tế và tài chính xanh. Kết quả cho thấy phần lớn giải pháp kỹ thuật đã sẵn có, song hiệu quả thực tế phụ thuộc vào 4 nhóm điều kiện: Thể chế - pháp lý, kinh tế - tài chính, kỹ thuật - công nghệ và năng lực con người. Bài báo chỉ ra các khoảng trống nghiên cứu và đề xuất định hướng cho ngành Xây dựng Việt Nam về quy chuẩn phát thải toàn vòng đời, dữ liệu vật liệu, tài chính xanh và nguồn nhân lực.

Từ khóa: Công trình xanh; giảm phát thải; công trình chống chịu; biến đổi khí hậu; xây dựng bền vững.

ABSTRACT

This paper synthesises international research on greenhouse gas mitigation strategies in the building sector to draw lessons for Vietnam's 2050 net-zero commitment. An integrative review of 29 publications (2008 - 2025) covers five streams: Embodied carbon and life cycle assessment; operational energy efficiency; green materials and the circular economy; passive design; economic instruments and green finance. Most technical solutions already exist, but their effectiveness depends on four groups of enabling conditions: Institutional, financial, technological and human capacity. Research gaps are identified and directions are proposed for Vietnam on whole-life carbon regulation, material data, green finance and workforce capacity.

Keywords: Green building; emission reduction; resilient building; climate change; sustainable construction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại các nền kinh tế phát triển, tòa nhà tiêu thụ khoảng 20 - 40% tổng năng lượng cuối cùng [1]. Ngoài năng lượng vận hành, mỗi công trình còn gắn với lượng phát thải phát sinh từ khai thác, sản xuất, vận chuyển vật liệu và thi công, gọi là phát thải tiềm ẩn (embodied carbon - EC). Khi công trình càng tiết kiệm năng lượng, tỷ trọng EC trong tổng phát thải vòng đời càng tăng [2]. Vì vậy, mục tiêu trung hòa carbon trong xây dựng chỉ đạt được khi tiếp cận theo toàn vòng đời công trình, thay vì chỉ tập trung vào giai đoạn vận hành như cách làm phổ biến trước đây.

Hai thập kỷ qua, nghiên cứu quốc tế về giảm phát thải trong xây dựng mở rộng sang nhiều hướng, từ đánh giá vòng đời, công trình năng lượng ròng bằng "0", vật liệu sinh học, kinh tế tuần hoàn đến thiết kế thụ động và định giá carbon. Tuy nhiên, các kết quả còn phân tán theo chuyên ngành: Phần lớn nghiên cứu về EC chỉ xét giai đoạn sản xuất vật liệu [3], trong khi kinh nghiệm chính sách của Liên minh châu Âu (EU) cho thấy giải pháp kỹ thuật chỉ phát huy tác dụng khi có quy định bắt buộc và lộ trình dài hạn [4]. Việc đặt các hướng nghiên cứu này trong một khung phân tích thống nhất vì thế có ý nghĩa cả về lý luận lẫn thực tiễn, nhất là đối với các quốc gia đang xây dựng chính sách như Việt Nam.

Với Việt Nam, yêu cầu tổng hợp này càng cấp thiết. Tại COP26 năm 2021, Việt Nam cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050. Khung pháp lý đã từng bước hình thành với Nghị định số 06/2022/NĐ-CP về giảm nhẹ phát thải khí nhà kính [5] và QCVN 09:2017/BXD về công trình sử dụng năng lượng hiệu quả [6]. Song, các công cụ này chủ yếu hướng tới năng lượng vận hành; EC, vật liệu carbon thấp và tài chính cho công trình xanh chưa được đề cập đầy đủ. Trong khi đó, quá trình

đô thị hóa khiến nhu cầu xây mới vẫn ở mức cao, nên các quyết định về thiết kế, vật liệu và chính sách hôm nay sẽ quyết định mức phát thải của ngành trong nhiều thập kỷ tới.

Bài báo hướng tới 3 mục tiêu: (1) Hệ thống hóa các nghiên cứu quốc tế tiêu biểu theo năm hướng chủ đề; (2) nhận diện các điều kiện quyết định khả năng triển khai và các khoảng trống nghiên cứu; (3) rút ra bài học cho ngành Xây dựng Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng phương pháp tổng quan tích hợp (integrative review) kết hợp phân tích nội dung theo chủ đề. Phương pháp này phù hợp vì bằng chứng trong lĩnh vực tồn tại dưới nhiều dạng: Nghiên cứu thực nghiệm, mô hình hóa, tổng quan hệ thống, phân tích tổng hợp và báo cáo chính sách. Khác với phân tích tổng hợp (meta-analysis), nghiên cứu không gộp các chỉ số định lượng; số liệu nêu trong bài là kết quả do tác giả gốc công bố, được dùng làm minh chứng cho từng nhận định.

2.2. Nguồn tài liệu và tiêu chí lựa chọn

Tài liệu được chọn lọc từ các tạp chí quốc tế có bình duyệt (Energy and Buildings, Applied Energy, Journal of Cleaner Production, Nature Sustainability, Nature Climate Change…) và báo cáo kỹ thuật của các tổ chức như NIST hay Climate Bonds Initiative. Tiêu chí lựa chọn gồm: (a) Đề cập trực tiếp giải pháp hoặc công cụ chính sách giảm phát thải liên quan đến xây dựng; (b) ưu tiên tổng quan hệ thống, phân tích tổng hợp hoặc nghiên cứu dựa trên tập dữ liệu lớn; (c) có kết quả định lượng hoặc khung lý luận có thể đối chiếu; (d) bổ sung một số công trình nền tảng. Kết quả có 29 tài liệu công bố giai đoạn 2008 - 2025 được đưa vào phân tích. Các văn bản pháp lý của Việt Nam chỉ dùng để mô tả bối cảnh.

2.3. Khung phân tích

Mỗi tài liệu được ghi nhận theo đối tượng, phương pháp, phát hiện chính và hàm ý chính sách, sau đó phân loại theo hai chiều: Hướng chủ đề (Bảng 1) và nhóm điều kiện triển khai mà tài liệu cung cấp bằng chứng (thể chế - pháp lý; kinh tế - tài chính; kỹ thuật - công nghệ; năng lực con người). Các phát hiện được so sánh để xác định điểm đồng thuận và khoảng trống, rồi đối chiếu với bối cảnh Việt Nam. Bài học rút ra mang tính định hướng và cần được kiểm chứng thêm bằng nghiên cứu thực nghiệm trong nước.

Bảng 1. Phân bố tài liệu tổng quan theo hướng chủ đề

STT	Hướng chủ đề	Số tài liệu	Tài liệu	Giai đoạn
1	Phát thải tiềm ẩn và đánh giá vòng đời	6	[2, 3, 7-10]	2010 - 2024
2	Hiệu quả năng lượng vận hành và NZEB	6	[1, 4, 11-14]	2008 - 2023
3	Vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn	6	[15-20]	2013 - 2025
4	Thiết kế thụ động và vi khí hậu đô thị	4	[21-24]	2008 - 2018
5	Công cụ kinh tế, tài chính xanh, định giá carbon	7	[25-31]	2022 - 2025
	Tổng cộng	29		2008 - 2025

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Phát thải tiềm ẩn và đánh giá vòng đời

Nền tảng lý luận của hướng này được đặt ra bởi Dixit và cộng sự [7], khi xác định 6 nhóm tham số chi phối độ chính xác của phép đo năng lượng tiềm ẩn: Ranh giới hệ thống, phương pháp phân tích, nguồn dữ liệu, loại vật liệu, công nghệ sản xuất và bối cảnh địa lý. Rà soát hơn 400 công trình, Pomponi và Moncaster [3] nhận thấy đa số chỉ đánh giá giai đoạn sản xuất vật liệu (mô-đun A1-A3 theo EN 15978), bỏ qua thi công, vận hành, bảo dưỡng và cuối vòng đời, dẫn đến đánh giá thấp EC thực tế, từ đó các tác giả đề nghị áp dụng đánh giá vòng đời toàn diện (whole-life LCA).

Dựa trên dữ liệu khoảng 650 công trình, Röck và cộng sự [2] chứng minh tỷ trọng EC tăng theo mức cải thiện hiệu suất vận hành và dự báo đến năm 2050, EC có thể chiếm tới 50% tổng phát thải của các tòa nhà xây mới. EC vì thế được gọi là "thách thức ẩn" của chiến lược giảm nhẹ và phát hiện này đã thúc đẩy nhiều quốc gia đưa yêu cầu EC vào quy chuẩn xây dựng. Hàm ý quan trọng là các chính sách chỉ dựa trên hiệu quả năng lượng vận hành sẽ ngày càng bỏ sót phần phát thải lớn của công trình.

Về quan hệ giữa carbon và chi phí, phân tích độ nhạy của Gauch và cộng sự [8] cho tòa nhà nhiều tầng cho thấy lựa chọn vật liệu kết cấu ảnh hưởng lớn nhất đến dấu chân carbon và có thể tối ưu đồng thời EC, chi phí xây dựng và năng lượng vận hành mà không cần đánh đổi. Kết quả này phản bác quan niệm công trình xanh tất yếu đắt hơn công trình thông thường, đồng thời cho thấy giai đoạn thiết kế sơ bộ là thời điểm có nhiều dư địa giảm phát thải nhất. Báo cáo NIST SP 1324 của Zhang và cộng sự [9] rà soát hơn 5.000 tài liệu từ 40 quốc gia, khẳng định việc kết hợp điện đã khử carbon, thép và bê tông carbon thấp, gỗ kỹ thuật và tối ưu thiết kế có thể đưa EC về mức "0" vào năm 2050 bằng công nghệ hiện có, với LCA theo EN 15978 là nền tảng phương pháp.

Ở cấp quản lý, Zhu và cộng sự [10] xây dựng bộ dữ liệu chuẩn EC cho 28 loại tòa nhà tại Trung Quốc, làm ngưỡng tham chiếu cho quy chuẩn quốc gia. Nhìn chung, phương pháp luận toàn vòng đời đã đạt đồng thuận cao, nhưng mỗi quốc gia cần dữ liệu vật liệu và ngưỡng tham chiếu riêng mới có thể áp dụng. Đây là điều kiện mà các nước đang phát triển, vốn thiếu dữ liệu vật liệu trong nước, cần đặc biệt quan tâm.

3.2. Hiệu quả năng lượng vận hành và công trình năng lượng ròng bằng "0"

Đây là hướng nghiên cứu lâu đời nhất. Tỷ trọng 20 - 40% năng lượng cuối cùng do Pérez-Lombard và cộng sự [1] xác lập đã đưa tòa nhà vào trung tâm chính sách năng lượng - khí hậu. Khi mục tiêu chuyển sang công trình năng lượng ròng bằng "0" (NZEB), Marszal và cộng sự [11] phân tích 30 định nghĩa từ 14 quốc gia và chỉ ra sự thiếu nhất quán về ranh giới hệ thống, nguồn năng lượng tái tạo được tính và phương pháp cân bằng; nhu cầu chuẩn hóa này sau đó được EU giải quyết qua Chỉ thị Hiệu quả Năng lượng công trình (EPBD) sửa đổi.

Đánh giá 36 công cụ mô phỏng, Attia và cộng sự [12] kết luận khoảng trống lớn nhất là năng lực sử dụng công cụ của đội ngũ thiết kế chứ không phải sự thiếu công cụ. Nói cách khác, đầu tư cho đào tạo có ý nghĩa không kém đầu tư cho công nghệ. Dữ liệu về các dự án NZEB tại châu Âu [13] cho thấy tốc độ triển khai giữa các nước EU chênh lệch lớn, phụ thuộc vào mức nghiêm ngặt của quy chuẩn, hỗ trợ tài chính và năng lực kỹ thuật của ngành.

Phân tích 50 năm chính sách của EU dựa trên hơn 1.000 tài liệu, Economidou và cộng sự [4] kết luận tiêu chuẩn hiệu suất bắt buộc, khi được thực thi nghiêm, hiệu quả hơn ưu đãi tự nguyện. Nghiên cứu còn ghi nhận "hiệu ứng kỳ vọng": Tiêu chuẩn được công bố trước khi có hiệu lực khiến thị trường điều chỉnh sớm, cho thấy giá trị của lộ trình chính sách dài hạn. Tổng quan 248 nghiên cứu của Hafez và cộng sự [14] phân loại 15 chiến lược kỹ thuật và cho rằng con đường khả thi nhất là kết hợp cam kết chính sách quốc gia với đổi mới hệ thống HVAC và vỏ bao che; ba nhóm rào cản chính là kỹ thuật (hiệu suất thực tế thấp hơn thiết kế), kinh tế (chi phí đầu tư ban đầu cao) và thể chế (thiếu quy chuẩn bắt buộc). Như vậy, các nghiên cứu trong hướng này cùng hội tụ ở nhận định rằng hiệu quả năng lượng vận hành không còn là vấn đề thuần túy kỹ thuật, mà là kết quả phối hợp giữa quy chuẩn, tài chính và năng lực con người.

3.3. Vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn

Munaro và Tavares [15] cùng Hernández [16] cho rằng khả năng tái sử dụng kết cấu thép và bê tông cuối vòng đời là điều kiện then chốt của kinh tế tuần hoàn trong xây dựng; nguyên tắc "thiết kế để tháo dỡ" (DfD) đang trở thành nguyên tắc cốt lõi của xây dựng xanh thế hệ mới. Với gỗ kỹ thuật (CLT), mô hình của Churkina và cộng sự [17] cho thấy nếu 90% tòa nhà xây mới giai đoạn 2020 - 2050 dùng gỗ kỹ thuật, ngành Xây dựng có thể lưu trữ 0,01 - 0,68 tỷ tấn carbon mỗi năm, tức chuyển từ nguồn phát thải thành bể chứa carbon. Kết quả này là cơ sở khoa học cho các chính sách khuyến khích vật liệu sinh học, dù khả năng áp dụng còn phụ thuộc vào nguồn cung gỗ bền vững.

Trên nền tảng do MacArthur [18] đặt ra, Ghisellini và cộng sự [19] xác định ba chiến lược tuần hoàn cho ngành: Giảm vật liệu đầu vào qua tối ưu thiết kế, tái sử dụng cấu kiện nguyên vẹn và tái chế phế thải, đồng thời nhấn mạnh yêu cầu thay đổi mô hình kinh doanh trên toàn chuỗi giá trị. Các chương trình quốc tế, trong đó có Chương trình Xây dựng Bền vững của UNEP và dự án Annex 57 của IEA EBC [20] đều coi phương pháp đánh giá thống nhất và tuyên bố môi trường sản phẩm (EPD) được kiểm chứng độc lập là điều kiện tiên quyết cho thị trường vật liệu xanh. Như vậy, giảm phát thải từ vật liệu phụ thuộc không chỉ vào công nghệ mà còn vào hạ tầng dữ liệu và tổ chức chuỗi cung ứng.

3.4. Thiết kế thụ động và vi khí hậu đô thị

Santamouris [21] định lượng rằng mỗi độ C tăng thêm do đảo nhiệt đô thị làm nhu cầu làm mát tăng 1,5 - 4% và giảm hiệu suất hệ thống lạnh; các biện pháp như bề mặt phản xạ, cây xanh, mái xanh vì vậy vừa giảm tiêu thụ năng lượng vừa bảo vệ sức khỏe cộng đồng trong các đợt nắng nóng, tức đồng thời phục vụ mục tiêu giảm nhẹ và thích ứng. Akbari và cộng sự [22, 23] ước tính nếu 80% mái nhà và 50% mặt đường đô thị toàn cầu chuyển sang bề mặt có độ phản xạ cao, hiệu ứng làm mát tương đương loại bỏ 44 tỷ tấn CO_2, lớn hơn tổng phát thải toàn cầu trong hơn một năm. Thiết kế bề mặt đô thị vì vậy có thể trở thành một chiến lược khí hậu chi phí thấp nhưng hiệu quả cao.

Ở cấp công trình, Toutou và cộng sự [24] dùng tối ưu hóa tham số với thuật toán di truyền cho nhà ở vùng khí hậu nóng, xác định hướng nhà, che nắng và thông gió tự nhiên là ba yếu tố tác động mạnh nhất đến tải làm mát; phương án tối ưu giảm 40 - 60% tải làm mát mà không tăng đáng kể chi phí. Kết quả có giá trị tham khảo cho Việt Nam nhưng cần kiểm chứng trong điều kiện nhiệt đới nóng ẩm. Đây là nhóm giải pháp chi phí thấp, ít phụ thuộc công nghệ nhập khẩu và phục vụ đồng thời giảm nhẹ lẫn thích ứng.

3.5. Công cụ kinh tế, tài chính xanh và định giá carbon

Sử dụng học máy trên dữ liệu hơn 30 ngành trong 20 năm, Abrell và cộng sự [25] cho thấy định giá carbon thúc đẩy hiệu quả đổi mới công nghệ và giảm phát thải, nhất là khi giá vượt 50 USD/tCO_2. Phân tích tổng hợp 65 nghiên cứu từ 20 quốc gia của Ahmad và cộng sự [26] cho thấy thuế carbon tạo ổn định chi phí cho đầu tư dài hạn, còn hệ thống giao dịch phát thải (ETS) linh hoạt hơn trong kiểm soát tổng lượng; hiệu quả của cả hai phụ thuộc vào tính nhất quán của mục tiêu quốc gia (NDC). Với ngành Xây dựng, dữ liệu bảng 30 tỉnh của Trung Quốc [27] cho thấy giao dịch carbon cải thiện năng suất nhân tố tổng hợp xanh, chủ yếu qua đổi mới công nghệ xanh và nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn lực. Đáng chú ý, tác động mạnh hơn ở các địa phương có chất lượng quản trị tốt, cho thấy năng lực thể chế là điều kiện để công cụ kinh tế chuyển hóa thành kết quả thực tế.

Về tài chính xanh, tổng quan 94 nghiên cứu của Akomea-Frimpong và cộng sự [28] xác định động lực là lợi ích kinh tế, quy định rõ ràng và nhận thức cao; rào cản là chi phí ban đầu lớn, nhận thức hạn chế về lợi ích dài hạn và thiếu minh bạch thị trường. Nghiên cứu tại Ghana [29], một nước đang phát triển có nhiều điểm tương đồng với Việt Nam, bổ sung rằng thiếu vốn và thiếu hỗ trợ quản lý là rào cản đặc thù của thị trường mới nổi và khó giải quyết chỉ bằng cơ chế thị trường. Báo cáo của Climate Bonds Initiative [30] về hơn 1.200 đợt phát hành trái phiếu xanh giai đoạn 2010 - 2023 chỉ ra 3 rủi ro: "tẩy xanh", thanh khoản và thay đổi chính sách, qua đó khẳng định vai trò của hệ thống đo đạc, báo cáo, thẩm định (MRV) và bộ phân loại xanh. Cuối cùng, Linsenmeier và cộng sự [31] chứng minh lan tỏa định giá carbon sang các nước đang phát triển qua hợp tác quốc tế mang lại lợi ích toàn cầu lớn hơn tổng hành động riêng lẻ, nhờ tác động lan tỏa về công nghệ và thị trường, qua đó củng cố cơ sở cho các cơ chế hợp tác theo Điều 6 Thỏa thuận Paris.

3.6. Bàn luận tổng hợp

Các hướng nghiên cứu hội tụ ở ba điểm: Giải pháp công nghệ cho giảm sâu phát thải phần lớn đã sẵn có [9]; giảm phát thải không nhất thiết tăng chi phí nếu tích hợp từ khâu thiết kế [8, 24]; khoảng cách giữa tiềm năng kỹ thuật với kết quả thực tế do các điều kiện triển khai quyết định (Bảng 2).

Bảng 2. Nhóm điều kiện triển khai và bằng chứng tiêu biểu

Nhóm điều kiện	Nội dung chủ yếu	Tài liệu
Thể chế - pháp lý	Quy chuẩn bắt buộc, lộ trình dài hạn, NDC, MRV, phân loại xanh	[4, 10, 11, 13, 14, 26, 30]
Kinh tế - tài chính	Định giá carbon, ETS, tài chính và trái phiếu xanh, hỗ trợ vốn ban đầu	[25-29, 31]
Kỹ thuật - công nghệ	LCA, vật liệu carbon thấp, gỗ kỹ thuật, HVAC, vỏ bao che, thiết kế thụ động	[2, 3, 7-9, 17, 21, 22, 24]
Năng lực con người	Kỹ năng mô phỏng và LCA, nhận thức của chủ đầu tư, nhà tài trợ	[12, 13, 28]

Các nhóm điều kiện này tác động qua lại: Chất lượng thể chế quyết định hiệu quả công cụ kinh tế [27]; quy chuẩn, tài chính và năng lực cùng chi phối tốc độ triển khai NZEB [13]; công cụ kỹ thuật chỉ phát huy khi có người đủ năng lực sử dụng [12]. Do đó, chiến lược giảm phát thải cần được thiết kế như một hệ thống chính sách đồng bộ, thay vì tập hợp các giải pháp rời rạc do từng cơ quan hoặc từng chuyên ngành đề xuất.

Hướng nghiên cứu này còn bốn hạn chế: (i) Cách tiếp cận thiên về công nghệ, chưa tích hợp đầy đủ rào cản thể chế và thị trường; (ii) bằng chứng chủ yếu từ các nước phát triển, rất hạn chế ở Đông Nam Á; (iii) yếu tố hành vi, xã hội và năng lực con người chưa được nghiên cứu có hệ thống; (iv) mục tiêu giảm nhẹ hầu như chưa được xem xét cùng mục tiêu thích ứng, khiến một số giải pháp có nguy cơ mất hiệu quả trước thời tiết cực đoan. Đây cũng chính là những khoảng trống mà các nghiên cứu tại Việt Nam có thể đóng góp, đặc biệt về bằng chứng thực nghiệm trong điều kiện khí hậu nhiệt đới và thể chế của một nền kinh tế đang chuyển đổi.

3.7. Bài học cho ngành Xây dựng Việt Nam

Từ kết quả tổng quan, có thể rút ra một số bài học cho ngành Xây dựng Việt Nam như sau.

Thứ nhất, mở rộng quy chuẩn từ năng lượng vận hành sang phát thải toàn vòng đời. QCVN 09:2017/BXD [6] chưa bao quát EC; kinh nghiệm quốc tế [2, 4] gợi ý đưa yêu cầu EC vào theo lộ trình, bắt đầu bằng nghĩa vụ báo cáo với công trình vốn nhà nước hoặc quy mô lớn rồi tiến tới ngưỡng giới hạn và công bố lộ trình sớm để tận dụng hiệu ứng kỳ vọng.

Thứ hai, xây dựng cơ sở dữ liệu phát thải vật liệu và ngưỡng tham chiếu quốc gia. Kinh nghiệm của Trung Quốc [10] và các khuyến nghị quốc tế [20] cho thấy không thể quản lý EC nếu thiếu dữ liệu phản ánh đúng công nghệ sản xuất trong nước; bước khởi đầu cần thiết là khuyến khích các nhà sản xuất xi măng, thép, gạch, kính công bố EPD được kiểm chứng độc lập.

Thứ ba, ưu tiên thiết kế thụ động và chống nóng đô thị phù hợp khí hậu nhiệt đới [21, 22, 24], cụ thể hóa hướng dẫn về hướng nhà, che nắng, thông gió tự nhiên, mái phản xạ và cây xanh cho từng

vùng khí hậu. Đây là nhóm giải pháp có thể triển khai ngay, chi phí thấp và tận dụng được kinh nghiệm kiến trúc truyền thống.

Thứ tư, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn bằng cách lồng ghép nguyên tắc thiết kế để tháo dỡ, tái sử dụng và tái chế [15, 19] vào quản lý chất thải xây dựng và chính sách công nghiệp hóa xây dựng; riêng gỗ kỹ thuật [17] cần đánh giá khả thi về nguồn nguyên liệu, phòng cháy và năng lực sản xuất trong nước.

Thứ năm, hoàn thiện công cụ kinh tế - tài chính. Lộ trình thị trường carbon theo Nghị định 06/2022/NĐ-CP [5] là cơ hội đưa cơ sở sản xuất vật liệu phát thải lớn vào phạm vi kiểm kê và giao dịch, đi kèm hệ thống MRV và bộ phân loại xanh [30]; đồng thời cần tín dụng ưu đãi, bảo lãnh hoặc tài chính hỗn hợp vì cơ chế thị trường khó tự tháo gỡ rào cản vốn [29].

Thứ sáu, đầu tư vào năng lực con người [12]: Đưa LCA, mô phỏng năng lượng và thiết kế carbon thấp vào đào tạo đại học và bồi dưỡng cán bộ quản lý xây dựng. Cuối cùng, lồng ghép giảm nhẹ với thích ứng. Với mức độ dễ bị tổn thương cao trước biến đổi khí hậu, Việt Nam cần ưu tiên các giải pháp vừa giảm phát thải vừa tăng khả năng chống chịu của công trình, tránh để khoản đầu tư giảm nhẹ bị vô hiệu hóa bởi thiên tai và thời tiết cực đoan.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng quan 29 tài liệu quốc tế về chiến lược giảm nhẹ phát thải trong xây dựng theo 5 hướng chủ đề: Phát thải tiềm ẩn và đánh giá vòng đời; hiệu quả năng lượng vận hành; vật liệu xanh và kinh tế tuần hoàn; thiết kế thụ động; công cụ kinh tế và tài chính xanh. Kết quả cho thấy giảm phát thải cần tiếp cận theo toàn vòng đời công trình, vì phát thải tiềm ẩn ngày càng chiếm tỷ trọng lớn khi hiệu quả vận hành được cải thiện. Phần lớn giải pháp kỹ thuật đã sẵn có và không nhất thiết làm tăng chi phí nếu được tích hợp từ khâu thiết kế; song hiệu quả thực tế phụ thuộc vào sự đồng bộ của 4 nhóm điều kiện: Thể chế - pháp lý, kinh tế - tài chính, kỹ thuật - công nghệ và năng lực con người, trong đó quy chuẩn bắt buộc gắn với lộ trình dài hạn, dữ liệu minh bạch và năng lực chuyên môn giữ vai trò nền tảng.

Bài báo cũng chỉ ra 4 khoảng trống nghiên cứu: Cách tiếp cận thiên về công nghệ, thiếu bằng chứng từ Đông Nam Á, chưa chú trọng yếu tố hành vi và năng lực con người và sự tách rời giữa giảm nhẹ với thích ứng.

Đối với Việt Nam, các định hướng đề xuất gồm: Mở rộng quy chuẩn sang phát thải toàn vòng đời; xây dựng cơ sở dữ liệu phát thải vật liệu; ưu tiên thiết kế thụ động; thúc đẩy kinh tế tuần hoàn; hoàn thiện định giá carbon và tài chính xanh đi kèm MRV; phát triển nguồn nhân lực; lồng ghép giảm nhẹ với thích ứng. Do các định hướng này được suy luận từ bằng chứng quốc tế, nghiên cứu tiếp theo cần lượng hóa phát thải tiềm ẩn của công trình điển hình tại Việt Nam, đánh giá chi phí - lợi ích của các giải pháp trong điều kiện trong nước và khảo sát năng lực của các chủ thể trong ngành, làm cơ sở cụ thể hóa lộ trình giảm phát thải cho ngành Xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Pérez-Lombard, L., J. Ortiz and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. Energy and buildings, 40(3): pp. 394-398, 2008.

[2]Röck, M., et al. Embodied GHG emissions of buildings-The hidden challenge for effective climate change mitigation. Applied energy, 258: p. 114107, 2020.

[3] Pomponi, F. and A. Moncaster. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment-What does the evidence say? Journal of environmental management, 181: pp. 687-700, 2016.

[4] Economidou, M., et al. Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. Energy and buildings, 225: p. 110322, 2020.

[5] Chính phủ. Nghị định số 06/2022/NĐ-CP quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn, 2022.

[6] Bộ Xây dựng. QCVN 09:2017/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Các công trình xây dựng sử dụng năng lượng hiệu quả, 2017.

[7] Dixit, M.K., et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. Energy and buildings, 42(8): pp. 1238-1247, 2010.

[8] Gauch, H., et al. What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost and operational energy. Applied Energy, 333: p. 120585, 2023.

[9] Zhang, Y., et al. Systematic review of embodied carbon assessment and reduction in building life cycles. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology . . ., 2024.

[10] Zhu, C., et al. Embodied carbon emissions and mitigation potential in China's building sector: An outlook to 2060. Energy Policy, 170: p. 113222, 2022.

[11] Marszal, A.J., et al. Zero Energy Building-A review of definitions and calculation methodologies. Energy and buildings, 43(4): pp. 971-979, 2011.

[12] Attia, S., et al. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. Energy and buildings, 60: pp. 110-124, 2013.

[13] D'Agostino, D., et al. Data on nearly zero energy buildings (NZEBs) projects and best practices in Europe. Data in Brief, 39: p. 107641, 2021.

[14] Hafez, F.S., et al. Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations and pathways for future research. Energy strategy reviews, 45: p. 101013, 2023.

[15] Munaro, M.R. and S.F. Tavares. Design for adaptability and disassembly: guidelines for building deconstruction. Construction Innovation, 25(2): pp. 665-687, 2025.

[16] Hernández, H. Circular Industrialized Construction: A perspective through design for manufacturing, assembly and disassembly. Buildings, 15(13): p. 2174, 2025.

[17] Churkina, G., et al. Buildings as a global carbon sink. Nature sustainability, 3(4): pp. 269-276, 2020.

[18] MacArthur, E. Towards the circular economy. Journal of industrial ecology, 2(1): pp. 23-44, 2013.

[19] Ghisellini, P., C. Cialani and S. Ulgiati. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner production, 114: pp. 11-32, 2016.

[20] Birgisdottir, H., et al. IEA EBC annex 57 "evaluation of embodied energy and CO_2eq for building construction". Energy and buildings, 154: pp. 72-80, 2017.

[21] Santamouris, M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. Energy and buildings, 82: pp. 100-113, 2014.

[22] Akbari, H., S. Menon and A. Rosenfeld, Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO_2. Climatic change, 94(3): pp. 275-286, 2009.

[23] Akbari, H., S. Menon and A. Rosenfeld, Global cooling: Increasing solar reflectance of urban areas to offset CO_2. Climatic Change, 2008.

[24] Toutou, A., M. Fikry and W. Mohamed. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. Alexandria engineering journal, 57(4): pp. 3595-3608, 2018.

[25] Abrell, J., M. Kosch and S. Rausch. How effective is carbon pricing? A machine learning approach to policy evaluation. Journal of Environmental Economics and Management, 112: p. 102589, 2022.

[26] Ahmad, M., X.F. Li and Q. Wu. Carbon taxes and emission trading systems: Which one is more effective in reducing carbon emissions? A meta-analysis. Journal of Cleaner Production, 476: p. 143761, 2024.

[27] Yang, S., et al. Evaluating the impacts of carbon trading on green total productivity in construction: Insights from panel data in China. Humanities Social Sciences Communications, 12(1): pp. 1-18, 2025.

[28] Akomea-Frimpong, I., et al. Green finance for green buildings: a systematic review and conceptual foundation. Journal of cleaner production, 356: p. 131869, 2022.

[29] Debrah, C., et al. Driving factors for the adoption of green finance in green building for sustainable development in developing countries: The case of Ghana. Sustainable development, 32(6): pp. 6286-6307, 2024.

[30] Chouhan, N., C. Harrison and D. Sharma. Sustainable Debt Global State of The Market 2023. Climate Bonds Initiative, 2024.

[31] Linsenmeier, M., A. Mohommad and G. Schwerhoff, Global benefits of the international diffusion of carbon pricing policies. Nature Climate Change, 13(7): pp. 679-684, 2023.

■Ngày nhận bài: 13/8/2026 ■Ngày sửa bài: 20/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/8/2026

Xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu xây dựng dân dụng: Nghiên cứu tại TP Hồ Chí Minh

Developing a framework for assessing circular economy implementation of building contractors: a study in Ho Chi Minh City

> BÙI QUANG LUẬN[1], NGUYỄN VĂN MINH[2,*]
[1]HVCH Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP Hồ Chí Minh
Email: 2592008@student.hcmute.edu.vn
[2]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP Hồ Chí Minh
[*]Tác giả liên hệ: Email: nguyenvanminh@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Kinh tế tuần hoàn đang trở thành định hướng quan trọng trong phát triển ngành Xây dựng bền vững. Tuy nhiên, Việt Nam vẫn còn thiếu công cụ đo lường mức độ thực hiện tại cấp nhà thầu xây dựng. Nghiên cứu này xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn cho nhà thầu xây dựng dân dụng tại TP.HCM. Quy trình nghiên cứu gồm tổng quan tài liệu, tham vấn chuyên gia, khảo sát và phân tích nhân tố khám phá. Phân tích nhân tố khám phá cho kết quả bốn yếu tố đo lường và 17 biến quan sát. Các thành tố gồm năng lực quản trị và tích hợp kinh tế tuần hoàn, ứng dụng công nghệ số và thiết kế linh hoạt, quản lý chất thải và vật liệu trong dự án, cùng chuỗi cung ứng vật liệu tuần hoàn. Khung đề xuất cung cấp cơ sở đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn và hỗ trợ cải thiện hoạt động quản trị nhà thầu hướng tới phát triển bền vững.

Từ khóa: Kinh tế tuần hoàn; xây dựng bền vững; khung đánh giá; nhà thầu xây dựng.

ABSTRACT

The circular economy is becoming an important direction for sustainable construction development. However, Vietnam still lacks tools for measuring implementation at the contractor level. This study develops a framework for assessing circular economy implementation among civil construction contractors in Ho Chi Minh City. The research process includes a literature review, expert consultation, questionnaire survey, and exploratory factor analysis (EFA). The EFA results identify four measurement dimensions comprising 17 observed variables. These dimensions include management capability and circular economy integration, digital technology application and flexible design, construction waste and material management, and circular material supply chains. The proposed framework provides a structured basis for assessing circular economy implementation among contractors. It also supports improvements in contractor management practices toward more sustainable construction development.

Keywords: Circular economy; sustainable construction; measurement model; contractor.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

TP.HCM là trung tâm kinh tế lớn và có tốc độ đô thị hóa cao của cả nước. Quá trình phát triển đô thị tạo nhu cầu lớn về nhà ở và hạ tầng xây dựng. Hoạt động xây dựng vì vậy tiêu thụ đáng kể vật liệu, năng lượng và tài nguyên tự nhiên [1]. Đồng thời, quá trình thi công cũng phát sinh lượng lớn chất thải và các tác động môi trường [2]. Những vấn đề này làm gia tăng yêu cầu chuyển đổi mô hình phát triển ngành xây dựng theo hướng bền vững.

Kinh tế tuần hoàn được xem là một định hướng quan trọng cho quá trình chuyển đổi này [3]. Mô hình này hướng đến giảm khai thác tài nguyên và kéo dài vòng đời vật liệu. Các giải pháp tuần hoàn còn thúc đẩy tái sử dụng, tái chế và giảm chất thải xây dựng. Tại TP.HCM, phát triển xanh và quản lý chất thải đang được chú trọng hơn. Thành phố cũng đặt yêu cầu phát triển bền vững trong các định hướng phát triển mới.

Trong chuỗi giá trị xây dựng, nhà thầu trực tiếp quyết định nhiều hoạt động sử dụng tài nguyên. Các quyết định thi công ảnh hưởng đến vật liệu, chất thải, thiết bị và phương thức tổ chức công trường. Tuy nhiên, mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu vẫn khó đánh giá thống nhất. Các tiêu chí hiện có thường phân tán và chưa phản ánh đầy đủ đặc điểm thi công dân dụng [2, 4, 5].

Vì vậy, nghiên cứu xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn cho nhà thầu dân dụng. Khung được phát triển phù hợp với đặc điểm hoạt động xây dựng tại TP.HCM. Kết quả hỗ trợ nhận

diện mức độ thực hiện và các khía cạnh cần ưu tiên cải thiện. Đồng thời, khung cung cấp cơ sở cho doanh nghiệp và cơ quan quản lý thúc đẩy xây dựng tuần hoàn.

2. TỔNG QUAN

2.1. Các nghiên cứu quốc tế

Kinh tế tuần hoàn trong xây dựng đã phát triển mạnh trong nghiên cứu quốc tế. Hướng nghiên cứu ban đầu tập trung vào giảm chất thải và tái chế vật liệu. Các nghiên cứu gần đây mở rộng sang toàn bộ vòng đời công trình. Phạm vi này bao gồm thiết kế, thi công, vận hành, tháo dỡ và thu hồi vật liệu.

Nhiều khung đánh giá đã được phát triển nhằm lượng hóa mức độ tuần hoàn. Abadi và cộng sự [6] xây dựng khung PLACIT gồm 12 chỉ tiêu thuộc năm nhóm. Khung này đánh giá tính tuần hoàn xuyên suốt các giai đoạn của dự án. Anastasiades và cộng sự [7] phát triển Circular Construction Indicator cho ba giai đoạn chính. Các giai đoạn gồm thiết kế, xây dựng và kết thúc vòng đời công trình. Khung đánh giá dựa trên bốn nguyên tắc Reduce, Reuse, Recycle và Recover. Ở cấp công trình, Amarasinghe và cộng sự [5] phát triển khung đánh giá tuần hoàn vật liệu. Khung này gồm ba tiêu chí chính và 15 tiêu chí thành phần.

Một chuyển dịch đáng chú ý là đánh giá từ dự án sang tổ chức xây dựng. Jayakodi và cộng sự [2] xác định 18 chỉ tiêu cấp dự án và 20 chỉ tiêu cấp tổ chức. Trong đó, 16 chỉ tiêu xuất hiện đồng thời ở cả hai cấp độ. Nghiên cứu nhấn mạnh vai trò đặc biệt của nhà thầu chính trong chuyển đổi tuần hoàn. Nhà thầu trực tiếp quản lý vật liệu, chuỗi cung ứng và nhiều bên liên quan. Li và cộng sự [8] tổng kết 148 chỉ số định lượng, 160 chỉ số bán định lượng và 152 chỉ số định tính, được sử dụng trong đánh giá tính tuần hoàn. Tuy nhiên, nghiên cứu quốc tế vẫn ghi nhận sự khác biệt giữa các chỉ tiêu. Điều này cho thấy khung đánh giá cần được điều chỉnh theo từng đối tượng.

2.2. Các nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, kinh tế tuần hoàn đã được chính thức hóa trong chính sách quốc gia. Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 tạo nền tảng pháp lý cho kinh tế tuần hoàn. Tiếp đó, Quyết định số 687/QĐ-TTg năm 2022 phê duyệt Đề án phát triển kinh tế tuần hoàn. Năm 2025, Chính phủ ban hành Kế hoạch hành động quốc gia đến năm 2035. Kế hoạch thể hiện bước chuyển từ định hướng sang tổ chức triển khai cụ thể. Những chính sách này tạo điều kiện thúc đẩy kinh tế tuần hoàn trong xây dựng.

Sự chuyển dịch xanh của ngành xây dựng cũng ngày càng thể hiện rõ. Đến quý III/2025, Việt Nam có hơn 600 công trình xanh. Tổng diện tích các công trình đạt gần 17 triệu m^2 sàn. Hà Nội và TP.HCM là hai địa phương dẫn đầu cả nước. Tuy nhiên, nghiên cứu trong nước vẫn tập trung nhiều vào chất thải xây dựng. Hoang và cộng sự khảo sát 15 công trường xây dựng và phá dỡ tại Hà Nội. Nghiên cứu ghi nhận tỷ lệ tái sử dụng và tái chế chỉ khoảng 10% [9]. Đất đào, bê tông và gạch là các thành phần chất thải phổ biến nhất. Một nghiên cứu tiếp theo cho thấy hoạt động phá dỡ hiện tại vẫn thiếu tính tuần hoàn. Tỷ lệ tái chế trong các trường hợp khảo sát chỉ khoảng 3% [10]. Kết quả này phản ánh dư địa lớn cho thu hồi vật liệu và tháo dỡ chọn lọc.

Các nghiên cứu gần đây bắt đầu mở rộng sang rào cản thực hiện kinh tế tuần hoàn. Một nghiên cứu tại Việt Nam xác định 32 rào cản trong ngành Xây dựng [11]. Các rào cản nổi bật gồm nhận thức thấp và chi phí công nghệ xử lý cao. Thiếu đầu tư cho giáo dục và nghiên cứu cũng được xác định quan trọng.

Như vậy, Việt Nam đã hình thành nền tảng chính sách tương đối rõ ràng. Một số thực hành xanh cũng đang tăng nhanh trong ngành xây dựng. Tuy nhiên, nghiên cứu thực nghiệm vẫn chủ yếu đánh giá từng hoạt động riêng lẻ. Cách tiếp cận toàn diện tại cấp doanh nghiệp nhà thầu còn rất hạn chế.

2.3. Khoảng trống nghiên cứu

Phân tích tổng quan cho thấy khác biệt rõ giữa nghiên cứu quốc tế và Việt Nam. Các nghiên cứu quốc tế đã phát triển nhiều khung đo lường ở cấp vật liệu và công trình. Ngược lại, Việt Nam vẫn tập trung nhiều vào chất thải và rào cản. Một khung thống nhất để đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn vẫn chưa hình thành. Khoảng trống này đặc biệt quan trọng đối với nhà thầu xây dựng dân dụng. Nhà thầu trực tiếp kiểm soát nhiều quyết định ảnh hưởng đến tính tuần hoàn. Những quyết định này liên quan vật liệu, thi công, chất thải và nhà cung cấp. Tuy nhiên, hiện chưa rõ cần sử dụng những tiêu chí nào để đánh giá. Cũng chưa rõ các tiêu chí này nên được tổ chức thành những nhóm nào.

Việc thiếu công cụ đo lường tạo ra nhiều hệ quả trong thực tiễn quản trị. Nhà thầu khó xác định mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn của doanh nghiệp và nhận diện những hoạt động cần ưu tiên cải thiện. Cơ quan quản lý cũng thiếu căn cứ để so sánh giữa các nhà thầu. Việc theo dõi quá trình chuyển đổi sang kinh tế tuần hoàn vì vậy thiếu tính nhất quán.

Khoảng trống này càng đáng chú ý tại TP.HCM, nơi có nhu cầu ngày càng lớn về nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên trong hoạt động xây dựng. Nhà thầu cần một công cụ đánh giá phản ánh sát các hoạt động thực tế tại doanh nghiệp và công trường. Do đó, nghiên cứu này hướng tới xây dựng khung đánh giá mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn dành cho nhà thầu xây dựng dân dụng tại TP.HCM.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện theo ba bước chính nhằm xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn. Quy trình nghiên cứu kết hợp tổng quan tài liệu, tham vấn chuyên gia, khảo sát và phân tích nhân tố khám phá EFA.

Bước 1 tập trung xây dựng danh sách các tiêu chí đánh giá ban đầu. Nghiên cứu tổng hợp các công trình trong và ngoài nước liên quan đến kinh tế tuần hoàn trong xây dựng. Từ kết quả tổng quan, 30 tiêu chí ban đầu được xác định và hệ thống hóa. Danh sách này tiếp tục được tham khảo ý kiến các chuyên gia có kinh nghiệm trong ngành xây dựng. Các chuyên gia đánh giá mức độ phù hợp, rõ ràng và khả năng áp dụng của từng tiêu chí. Sau quá trình hiệu chỉnh và loại bỏ các tiêu chí chưa phù hợp, 20 tiêu chí được giữ lại. Đây là cơ sở để xây dựng bảng câu hỏi khảo sát chính thức. Danh sách 20 tiêu chí được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Danh sách các tiêu chí đo lường

Mã hóa	Biến đo lường
TC1	Doanh nghiệp giảm sử dụng vật liệu nguyên sinh trong các dự án.
TC2	Doanh nghiệp triển khai các biện pháp tiết kiệm tài nguyên và kiểm soát tác động môi trường trong dự án.
TC3	Doanh nghiệp thực hiện phân loại chất thải tại nguồn.
TC4	Doanh nghiệp chuyển giao chất thải để tái chế hoặc tái sản xuất.
TC5	Doanh nghiệp ưu tiên lựa chọn nhà cung cấp có chứng nhận hoặc thực hành vật liệu bền vững.
TC6	Doanh nghiệp có khả năng truy xuất nguồn gốc vật liệu trong chuỗi cung ứng.
TC7	Doanh nghiệp tổ chức thu hồi và vận chuyển vật liệu, cấu kiện sau sử dụng để tái sử dụng hoặc tái chế.
TC8	Doanh nghiệp áp dụng phân tích vòng đời để chọn vật liệu có khả năng tái sử dụng hoặc tái chế cao.

TC9	Doanh nghiệp triển khai thiết kế linh hoạt cho phép công trình thay đổi công năng.
TC10	Doanh nghiệp áp dụng tiêu chí KTTH vào đánh giá lựa chọn nhà thầu, đối tác.
TC11	Doanh nghiệp thực hiện đánh giá các phương án thiết kế và kỹ thuật dựa trên tiêu chí KTTH.
TC12	Doanh nghiệp sử dụng BIM để quản lý chính xác khối lượng và thông tin vật liệu xuyên suốt dự án.
TC13	Doanh nghiệp sử dụng dữ liệu số để kiểm kê và quản lý tài nguyên theo vòng đời.
TC14	Doanh nghiệp ứng dụng công nghệ số để theo dõi dòng vật liệu trong dự án.
TC15	Doanh nghiệp sử dụng nền tảng số để phân tích và hỗ trợ ra quyết định về tài nguyên.
TC16	Doanh nghiệp tích hợp KTTH vào chiến lược phát triển doanh nghiệp.
TC17	Doanh nghiệp có bộ phận hoặc nhân sự phụ trách KTTH.
TC18	Doanh nghiệp triển khai đào tạo về KTTH.
TC19	Doanh nghiệp thiết lập KPI đo lường hiệu quả KTTH.
TC20	Doanh nghiệp phân bổ nguồn lực tài chính cho hoạt động KTTH.

Bước 2 tiến hành thu thập dữ liệu thông qua khảo sát bằng bảng câu hỏi. Đối tượng khảo sát là những người đang làm việc trong lĩnh vực xây dựng công trình tại TP.HCM. Nghiên cứu sử dụng phương pháp chọn mẫu có chọn lọc dựa trên mạng lưới quan hệ nghề nghiệp của nhóm nghiên cứu. Người tham gia được lựa chọn khi có kinh nghiệm thực tế liên quan đến hoạt động xây dựng dân dụng. Bảng câu hỏi yêu cầu người trả lời đánh giá mức độ thực hiện từng tiêu chí kinh tế tuần hoàn. Dữ liệu hợp lệ sau khảo sát được sử dụng cho bước phân tích tiếp theo.

Bước 3 sử dụng phân tích nhân tố khám phá nhằm xác định cấu trúc của các tiêu chí. Phân tích nhân tố khám phá (EFA) được áp dụng để kiểm tra mức độ hội tụ giữa các biến quan sát. Các tiêu chí không đáp ứng yêu cầu thống kê được xem xét loại khỏi mô hình. Những tiêu chí còn lại được nhóm thành các thành tố có ý nghĩa về mặt thực tiễn. Kết quả cuối cùng hình thành khung đánh giá mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu dân dụng tại TP.HCM.

4. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU

4.1. Thông tin người tham gia khảo sát

Tổng cộng 80 bảng trả lời hợp lệ được sử dụng cho phân tích. Nam giới chiếm tỷ lệ chủ yếu với 71.3%, trong khi nữ chiếm 28.7%. Về vị trí công việc, phần lớn người tham gia là nhân viên, chiếm 80.0%. Nhóm quản lý chiếm 15.0%, còn ban giám đốc chiếm 5%. Về kinh nghiệm, nhóm từ 5 đến 10 năm chiếm tỷ lệ cao nhất, đạt 50%. Nhóm dưới 5 năm chiếm 27.5%, còn nhóm trên 10 năm chiếm 22.5%. Như vậy, phần lớn người tham gia đã có kinh nghiệm làm việc tương đối ổn định.

4.2. Phân tích thành tố chính (EFA)

Phân tích nhân tố khám phá được thực hiện nhằm xác định cấu trúc của các tiêu chí đánh giá. Quá trình EFA được tiến hành qua ba lần để loại bỏ các biến chưa phù hợp. Ở lần đầu, TC1 và TC10 bị loại do hệ số tải nhỏ hơn 0.5. Tiếp theo, TC2 bị loại vì tải đồng thời trên hai thành tố khác nhau. Sau quá trình hiệu chỉnh, 17 biến đo lường được giữ lại cho mô hình cuối cùng.

Kết quả cho thấy hệ số KMO đạt 0.861, phản ánh mức độ phù hợp tốt của dữ liệu. Kiểm định Bartlett đạt 591.962 với mức ý nghĩa 0.000. Điều này xác nhận các biến có tương quan phù hợp để thực hiện EFA. Bốn thành tố được trích với Eigenvalue lần lượt là 7.044, 1.535, 1.160, 1.111. Tổng phương sai được giải thích đạt 63.816%, cho thấy mức độ giải thích tương đối tốt [1].

Thành tố thứ nhất gồm TC8, TC11, TC16, TC17, TC18, TC19 và TC20. Nhóm này được đặt tên là Năng lực quản trị và tích hợp kinh tế tuần hoàn. Thành tố thứ hai gồm TC9, TC13, TC14 và TC15. Nhóm này được đặt tên là Ứng dụng công nghệ số và thiết kế linh hoạt. Thành tố thứ ba gồm TC3, TC4 và TC12. Nhóm này được đặt tên là Quản lý chất thải và vật liệu trong dự án. Thành tố thứ tư gồm TC5, TC6 và TC7. Nhóm này được đặt tên là Chuỗi cung ứng vật liệu tuần hoàn.

Độ tin cậy của toàn bộ 17 biến đạt Cronbach's Alpha bằng 0.910. Các thành tố riêng cũng có Cronbach's Alpha từ 0.676 đến 0.881. Các giá trị này cho thấy mức độ nhất quán nội tại có thể chấp nhận [1]. Kết quả EFA vì vậy xác lập khung đánh giá gồm bốn thành tố và 17 biến đo lường. Kết quả được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả phân tích EFA

Biến đo lường	Thành tố			
	1	2	3	4
Năng lực quản trị và tích hợp kinh tế tuần hoàn				
TC8	0.575			
TC11	0.665			
TC16	0.644			
TC17	0.720			
TC18	0.745			
TC19	0.666			
TC20	0.793			
Ứng dụng công nghệ số và thiết kế linh hoạt				
TC9		0.749		
TC13		0.593		
TC14		0.733		
TC15		0.634		
Quản lý chất thải và vật liệu trong dự án				
TC3			0.600	
TC4			0.815	
TC12			0.515	
Chuỗi cung ứng vật liệu tuần hoàn				
TC5				0.581
TC6				0.652
TC7				0.778
Cronbach's Alpha	0.881	0.742	0.706	0.676
Eigen value	7.044	1.535	1.160	1.111
Tỷ lệ phương sai được giải thích (%)	23.260	17.192	12.024	11.341
Tỷ lệ phần trăm tích lũy (%)	23.260	40.452	52.476	63.816
Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) = 0.861				
Bartlett tests of sphericity =591.962				
Significance = 0.000				

5. HÀM Ý TỪ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả nghiên cứu cho thấy thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu không chỉ liên quan chất thải. Khung đánh giá cuối cùng gồm bốn nhóm phản ánh đồng thời năng lực tổ chức, công nghệ, vật liệu và chuỗi cung ứng. Cấu trúc này mở rộng cách tiếp cận vốn thường tập trung vào tái chế hoặc quản lý chất thải. Về lý thuyết, kết quả cho thấy kinh tế tuần hoàn trong xây dựng mang tính đa chiều. Việc chuyển đổi cần diễn ra đồng thời ở cấp dự án và cấp doanh nghiệp. Đặc biệt, nhóm năng lực quản trị và tích hợp kinh tế tuần hoàn có số biến lớn nhất. Điều này cho thấy yếu tố tổ chức giữ vai trò nền tảng trong chuyển đổi tuần hoàn. Các hoạt động như chiến lược, nhân sự, đào tạo và đo lường cần được xem xét đồng bộ.

Nhóm ứng dụng công nghệ số và thiết kế linh hoạt cũng tạo một hàm ý đáng chú ý. Công nghệ không nên được đánh giá riêng như một mục tiêu chuyển đổi số. Giá trị của công nghệ nằm ở khả năng hỗ trợ quản lý tài nguyên và quyết định tuần hoàn. BIM, dữ liệu số và theo dõi dòng vật liệu có thể hỗ trợ giảm thất thoát. Thiết kế linh hoạt còn tạo điều kiện kéo dài vòng đời và thay đổi công năng. Về thực tiễn, khung đánh giá cung cấp công cụ tự đánh giá cho các nhà thầu dân dụng. Doanh nghiệp có thể xác định nhóm hoạt động đang thực hiện tốt hoặc còn hạn chế. Kết quả cũng hỗ trợ phân bổ nguồn lực theo các nhóm tiêu chí ưu tiên.

Nhóm quản lý chất thải và vật liệu cần được ưu tiên tại cấp công trường. Nhà thầu nên thực hiện phân loại chất thải ngay tại nguồn phát sinh. Việc chuyển giao cần gắn với đơn vị có khả năng tái chế hoặc thu hồi. BIM có thể hỗ trợ kiểm soát khối lượng và giảm sai lệch vật liệu.

Nhóm chuỗi cung ứng vật liệu tuần hoàn cho thấy nhà thầu không thể chuyển đổi độc lập. Doanh nghiệp cần phối hợp với nhà cung cấp, đơn vị vận chuyển và tái chế. Việc truy xuất nguồn gốc nên trở thành tiêu chí trong lựa chọn vật liệu. TP.HCM đã hình thành định hướng phát triển chuỗi cung ứng xanh giữa các doanh nghiệp. Vì vậy, khung nghiên cứu có thể hỗ trợ đánh giá nhà thầu trong đấu thầu xanh. Khung cũng có thể làm cơ sở xây dựng tiêu chí hỗ trợ hoặc xếp hạng doanh nghiệp.

Ở cấp quản lý, TP.HCM đang phát triển công cụ đo lường tăng trưởng xanh theo ngành. Công cụ này hướng đến theo dõi và hỗ trợ quyết định ở cấp vi mô. Khung đánh giá của nghiên cứu có thể bổ sung lớp đo lường chuyên biệt cho nhà thầu dân dụng. Qua đó, chính sách kinh tế tuần hoàn có thể chuyển từ định hướng chung sang đánh giá thực hiện cụ thể.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này xây dựng khung đánh giá thực hiện kinh tế tuần hoàn cho nhà thầu dân dụng tại TP.HCM. Khung được phát triển từ tổng quan tài liệu, tham vấn chuyên gia và phân tích dữ liệu khảo sát. Từ 30 tiêu chí ban đầu, nghiên cứu sàng lọc còn 20 tiêu chí phù hợp. Sau ba lần phân tích EFA, 17 biến đo lường cuối cùng được giữ lại.

Kết quả xác định bốn thành tố chính phản ánh thực hiện kinh tế tuần hoàn của nhà thầu, bao gồm Năng lực quản trị và tích hợp kinh tế tuần hoàn, Ứng dụng công nghệ số và thiết kế linh hoạt, Quản lý chất thải và vật liệu trong dự án, Chuỗi cung ứng vật liệu tuần hoàn.

Khung đề xuất cho thấy kinh tế tuần hoàn không nên được đánh giá riêng bằng hoạt động tái chế. Việc thực hiện cần được xem xét đồng thời ở cấp tổ chức, dự án và chuỗi cung ứng. Khung có thể hỗ trợ nhà thầu tự đánh giá mức độ triển khai và xác định nội dung cần cải thiện. Cơ quan quản lý cũng có thể sử dụng làm cơ sở tham khảo khi xây dựng tiêu chí hỗ trợ doanh nghiệp.

Các nghiên cứu tiếp theo nên kiểm định khung trên mẫu lớn hơn và nhiều địa phương khác nhau. Nghiên cứu cũng có thể áp dụng CFA hoặc PLS-SEM để kiểm định cấu trúc thang đo. Một hướng khác là xây dựng trọng số cho từng thành tố và phát triển chỉ số tổng hợp. Điều này sẽ hỗ trợ so sánh mức độ thực hiện kinh tế tuần hoàn giữa các nhà thầu.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) thông qua Đề tài mã số 502.02-2025.01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Kim, S.Y., Nguyen, M.V. and Luu, V.T. A performance evaluation framework for construction and demolition waste management: stakeholder perspectives. Engineering, Construction and Architectural Management, vol. 27, no. 10, pp. 3189-3213. 2020.

[2] Jayakodi, S., Senaratne, S., Perera, S. and Bamdad, K. Circular economy assessment using project-level and organisation-level indicators for construction organisations: A systematic review. Sustainable Production and Consumption, vol. 48, pp. 324-338, 2024.

[3] Kocaer, O., Kul, A. and Aldemir, A. From principles to practice: A systematic literature review of design for manufacture and assembly and design for deconstruction strategies for a circular construction industry. Structural Concrete, 2026.

[4] Nuñez-Cacho, P., Górecki, J., Molina-Moreno, V. and Corpas-Iglesias, F.A. What gets measured, gets done: Development of a Circular Economy measurement scale for building industry. Sustainability, vol. 10, no. 7, 2018.

[5] Amarasinghe, I., Hong, Y. and Stewart, R.A. Development of a material circularity evaluation framework for building construction projects. Journal of Cleaner Production, vol. 436, p. 140562, 2024.

[6] Abadi, M., Moore, D.R. and Sammuneh, M.A. A framework of indicators to measure project circularity in construction circular economy. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law, vol. 175, no. 2, pp. 54-66, 2021.

[7] Anastasiades, K., Blom, J. and Audenaert, A. Circular Construction Indicator: Assessing circularity in the design, construction and end-of-life phase. Recycling, vol. 8, p. 29, 2023.

[8] Li, Q., Saelens, D., Kayaçetin, N.C., Aslanoğlu, R., van Hoof, J. and Piccardo, C. A systematic literature review on circularity assessment indicators and frameworks in the built environment. Sustainable Production and Consumption, vol. 58, pp. 412-431, 2025.

[9] Hoang, N.H. et al. Waste generation, composition and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. Waste Management, vol. 117, pp. 32-41, 2020.

[10] Hoang, N.H., Ishigaki, T., Watari, T., Yamada, M. and Kawamoto, K. Current state of building demolition and potential for selective dismantling in Vietnam. Waste Management, vol. 149, pp. 218-227, 2022.

[11] Nguyen, T.T., Do, S.T. and Nguyen, V.T. Investigating cause-effect relationships among barriers to circular economy adoption in construction: A case study in Vietnam. Construction Innovation, vol. 26, no. 5, pp. 1556-1581, 2025.

■Ngày nhận bài 30/7/2026 ■Ngày sửa bài: 08/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/8/2026

Một số giải pháp quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng tại TP Hà Nội theo định hướng phát triển bền vững

Selected solutions for improving state management of construction activities in Hanoi Towards sustainable development

> THS.NCS HÀ ANH TUẤN[1], PGS.TS NGUYỄN NGỌC PHƯƠNG[2], GS.TS ĐINH TUẤN HẢI[3]
[1]Bộ môn Quản lý đô thị và công trình, Khoa Sau đại học, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Khoa Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[3]Bộ môn Thi công và Máy xây dựng, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

TÓM TẮT

Đô thị hóa nhanh và sự gia tăng thích ứng trong các hoạt động xây dựng đang đặt ra yêu cầu nâng cao hiệu lực quản lý nhà nước tại Hà Nội theo định hướng phát triển bền vững. Bài báo tập trung xác định các giải pháp phù hợp với đặc điểm phát triển đô thị và mô hình chính quyền địa phương hai cấp. Kết quả nghiên cứu đề xuất bốn nhóm giải pháp chủ yếu: hoàn thiện thể chế, chính sách và công cụ quản lý; kiện toàn tổ chức bộ máy và nâng cao năng lực thực thi; nâng cao chất lượng quy hoạch và quản lý thực hiện quy hoạch; thúc đẩy ứng dụng khoa học - công nghệ và chuyển đổi số. Các giải pháp hướng đến tăng tính đồng bộ, minh bạch và trách nhiệm giải trình, nâng cao phối hợp giữa cấp thành phố với cấp xã, phường, đồng thời bảo đảm sự hài hòa giữa phát triển xây dựng với môi trường và bản sắc đô thị.

Từ khóa: Hoạt động xây dựng; quản lý nhà nước; phát triển bền vững; quy hoạch xây dựng; chuyển đổi số.

ABSTRACT

Rapid urbanization and the expansion of construction activities have created a pressing need to enhance the effectiveness of state management in Hanoi in accordance with sustainable development principles. This article identifies solutions tailored to the city's urban development characteristics and its two-tier local government system. The research findings propose four main groups of solutions: improving institutional and policy frameworks and management instruments; streamlining the organizational apparatus and strengthening implementation capacity; enhancing planning quality and the management of planning implementation; and promoting the application of science and technology and digital transformation. These solutions aim to improve coherence, transparency, and accountability; strengthen coordination between municipal and commune- and ward-level authorities; and ensure a balanced relationship between construction development, environmental protection, and the preservation of urban identity.

Keywords: Construction activities; state management; sustainable development; construction planning; digital transformation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đô thị hóa làm gia tăng mạnh nhu cầu đầu tư xây dựng và áp lực lên tài nguyên, môi trường. Năm 2018, khoảng 55% dân số thế giới sống tại đô thị; tỷ lệ này được dự báo đạt 68% vào năm 2050, với khoảng 2,5 tỷ người tăng thêm và gần 90% mức tăng tập trung tại châu Á và châu Phi [11]. Trong khi chỉ chiếm khoảng 3% diện tích đất liền, các đô thị tiêu thụ 60% - 80% tổng năng lượng và tạo ra khoảng 75% lượng phát thải carbon toàn cầu [12]. Vì vậy, hoạt động xây dựng cần được quản lý theo toàn bộ vòng đời công trình và gắn với mục tiêu phát triển bền vững.

Tại Việt Nam, tỷ lệ đô thị hóa năm 2024 đạt khoảng 44,3%. Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh xác định đô thị hóa thông minh, bền vững và có khả năng chống chịu với biến đổi khí hậu là định hướng quan trọng trong giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 [7]. Đối với Hà Nội, thành phố có diện tích tự nhiên 3.359,84 km^2, dân số đã vượt 8,5 triệu người đến năm 2030 có thể đạt khoảng 12 triệu người, trong đó dân số thường trú khoảng 10,5 triệu người và tỷ lệ đô thị hóa được định hướng đạt 80% - 85% vào năm 2050 [9]. Điều này làm gia tăng yêu cầu kiểm soát sự đồng bộ giữa xây dựng, hạ tầng, môi trường và bảo tồn bản sắc Thủ đô.

Các nghiên cứu trước đã đề cập đến hoàn thiện nội dung quản lý, tổ chức thực thi, phối hợp và xử lý vi phạm trong xây dựng đô thị [3], cũng như cơ chế, chính sách, quy hoạch, huy động nguồn lực và giám sát đầu tư phát triển đô thị xanh tại Hà Nội [4]. Tuy nhiên, hoạt động xây dựng tại Hà Nội chưa được xem xét đầy đủ như một hệ thống thống nhất, liên kết giữa quy hoạch, đầu tư, cấp phép, quản lý chất lượng, bảo vệ môi trường, bảo tồn bản sắc, chuyển đổi số và sự tham gia của cộng đồng. Bên cạnh đó, Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 và Luật Thủ đô số 02/2026/QH16 cùng có hiệu lực từ ngày 01/7/2026, tạo lập khuôn khổ mới về quản lý dự án, trật tự xây dựng, chất lượng công trình, trách nhiệm của các chủ thể và cơ chế quản trị đặc thù của Hà Nội [5, 6]. Điều này đặt ra yêu cầu Thành phố cần kịp thời rà soát thẩm quyền, quy trình quản lý, cơ chế phối hợp và phương thức kiểm tra, giám sát hoạt động xây dựng.

Từ những vấn đề trên, việc nghiên cứu các giải pháp quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng tại thành phố Hà Nội theo định hướng phát triển bền vững có ý nghĩa cả về lý luận và thực tiễn. Bài viết tập trung khái quát đặc điểm đô thị hóa, phát triển xây dựng của Hà Nội. Từ đó, xác định yêu cầu quản lý và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu lực, hiệu quả quản lý nhà nước, hài hòa tăng trưởng kinh tế, tiến bộ xã hội, bảo vệ môi trường và gìn giữ giá trị đặc trưng của Thủ đô.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài viết vận dụng phương pháp luận duy vật biện chứng, duy vật lịch sử và các phương pháp tổng hợp, quy nạp, diễn dịch, so sánh để xem xét quản lý nhà nước về xây dựng trong quan hệ với đô thị hóa và phát triển bền vững. Qua đó, nghiên cứu làm rõ đặc điểm phát triển xây dựng, yêu cầu quản lý và đề xuất giải pháp phù hợp với Hà Nội.

Dữ liệu thứ cấp được thu thập, phân tích từ văn bản pháp luật, chiến lược, quy hoạch, báo cáo thống kê, báo cáo của cơ quan quản lý nhà nước, nghiên cứu trong nước và tài liệu của tổ chức quốc tế. Tài liệu được sàng lọc theo nguồn công bố, thời điểm ban hành và mức độ phù hợp. Thông tin được kiểm tra, đối chiếu, so sánh giữa các nguồn để bảo đảm tính nhất quán, độ tin cậy và khả năng truy xuất.

3. ĐẶC ĐIỂM ĐÔ THỊ HÓA VÀ TÌNH HÌNH PHÁT TRIỂN XÂY DỰNG TẠI HÀ NỘI

Từ khi thực hiện công cuộc Đổi mới năm 1986, đặc biệt sau khi điều chỉnh địa giới hành chính năm năm 2008, Hà Nội đô thị hóa nhanh, phản ánh xu thế phát triển kinh tế - xã hội và đặc thù trung tâm chính trị - hành chính quốc gia. Quá trình này thúc đẩy tăng trưởng, hiện đại hóa hạ tầng, nâng cao chất lượng sống nhưng đặt ra thách thức về quy hoạch, kiểm soát xây dựng và phát triển bền vững [9].

Tỷ lệ đô thị hóa Hà Nội hiện cao hơn bình quân cả nước [9]. Mở rộng địa giới làm tăng diện tích thành phố, thúc đẩy phát triển đô thị ra vùng ven và nông thôn. Thành phố từng bước chuyển từ đô thị đơn cực sang đa trung tâm, kết nối bằng các hành lang phát triển và hạ tầng kỹ thuật liên vùng [10].

Không gian đô thị phát triển chưa đồng đều. Nội đô cũ có mật độ dân cư, xây dựng cao, trong khi đô thị vệ tinh và vành đai phát triển chưa tương xứng quy hoạch [9]. Các khu đô thị mới tăng nhanh nhưng một số nơi thiếu đồng bộ hạ tầng kỹ thuật, xã hội và giao thông. Nhà ở tự phát tại ngoại thành, ven đô ảnh hưởng đến quản lý không gian và môi trường sống [4].

Hoạt động xây dựng tăng nhanh, chủ yếu ở dự án nhà ở, chung cư cao tầng, khu đô thị mới và hạ tầng kỹ thuật [2]. Tuy nhiên, tỷ lệ công trình xanh, tiết kiệm năng lượng, thân thiện môi trường còn thấp và yêu cầu phát triển bền vững chưa được lồng ghép đồng đều giữa các khu vực, loại công trình [4].

Dân số gia tăng kéo theo nhu cầu nhà ở, giao thông và hạ tầng. Định hướng đến năm 2030, tầm nhìn 2050 tiếp tục mở rộng đô thị, phát triển hạ tầng khung, nâng năng lực giao thông, cấp thoát nước, điện lực và xử lý chất thải [9]. Dù Quy hoạch chung xây dựng Thủ đô, Quy hoạch Thủ đô thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 và các chương trình phát triển đô thị đã được ban hành, triển khai còn thiếu đồng bộ. Quy hoạch phân khu, chi tiết tại một số nơi chậm hoàn thiện, ảnh hưởng đến quản lý xây dựng.

Đặc điểm văn hóa - xã hội và di sản phong phú cũng chi phối mô hình đô thị hóa. Phát triển nhanh tại một số khu vực gây sức ép lên di sản, biến đổi kiến trúc truyền thống và cảnh quan, đòi hỏi lồng ghép bảo tồn văn hóa, lịch sử trong quản lý xây dựng. Những hạn chế về đồng bộ quy hoạch, đầu tư hạ tầng và kiểm soát xây dựng đặt ra yêu cầu rà soát mô hình quản lý, chuyển sang phương thức hiện đại, bền vững và gắn với bản sắc Hà Nội.

4. CÁC YÊU CẦU ĐẶT RA ĐỐI VỚI CÔNG TÁC QUẢN LÝ XÂY DỰNG THEO ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Tích hợp giữa quy hoạch - xây dựng - môi trường trong điều kiện phát triển đa trung tâm

Đô thị đa trung tâm đòi hỏi tích hợp quy hoạch, xây dựng và môi trường. Quản lý phân ngành, thiếu liên thông pháp lý, quy trình và dữ liệu dễ gây mâu thuẫn chính sách, khai thác đất vượt khả năng đáp ứng của hạ tầng và suy giảm hệ sinh thái. Dân số thường trú vượt 8,4 triệu người, mật độ gấp 2,5 lần bình quân cả nước, không khí nhiều ngày "kém" hoặc "xấu" [1] càng làm rõ áp lực này. Cần kết hợp GIS, bản đồ quy hoạch số với phối hợp thể chế, hành chính và liên ngành xuyên suốt quy hoạch, cấp phép, giám sát, vận hành.

Đảm bảo chất lượng công trình xây dựng trong điều kiện đô thị hóa nhanh

Quy mô xây dựng tăng đòi hỏi bảo đảm chất lượng, an toàn, hiệu quả đầu tư và chất lượng sống. Quản lý nhiều công trình, chủ thể gặp khó khăn do giám sát thiên về hậu kiểm, thiếu phòng ngừa và liên thông giữa thiết kế, thẩm định, cấp phép, thi công, nghiệm thu, nhất là khi xuất hiện công nghệ, vật liệu, loại công trình mới. Lộ trình BIM áp dụng cho một số loại công trình từ năm 2025 [8] đòi hỏi hoàn thiện thể chế, nhân lực và dữ liệu để chuyển sang quản trị chất lượng toàn diện, chủ động.

Kiểm soát tác động môi trường và chuyển đổi sang xây dựng xanh - phát thải thấp

Quản lý xây dựng phải kiểm soát môi trường và thúc đẩy tiêu chuẩn phát thải thấp. Yếu tố môi trường chưa được lồng ghép đầy đủ từ quy hoạch đến vận hành. Đánh giá tác động môi trường, giấy phép môi trường, quy chuẩn xanh còn tương đối độc lập với quản lý xây dựng. Tiêu chuẩn công trình xanh, vật liệu tái chế, tiết kiệm năng lượng, tuần hoàn tài nguyên chưa bắt buộc với phần lớn công trình. Chiến lược tăng trưởng xanh 2021 - 2030 đã ban hành [7] nhưng chưa được cụ thể hóa đầy đủ thành công cụ quản lý. Cần chuyển từ xử lý hậu quả sang phòng ngừa ngay khi phê duyệt dự án.

Bảo tồn bản sắc văn hóa - lịch sử trong phát triển không gian kiến trúc mới

Bảo tồn bản sắc văn hóa là yêu cầu đặc thù tại phố cổ, phố cũ, làng nghề ven đô và khu vực có giá trị kiến trúc, cảnh quan. Quản lý còn thiếu tiêu chí xác định bản sắc, công cụ pháp lý đủ hiệu lực để kiểm soát thiết kế mới, bảo vệ không gian truyền thống và định hình kiến trúc địa phương. Phối hợp quy hoạch, kiến trúc, xây

dựng, văn hóa và chính quyền còn hạn chế. Cần lồng ghép bảo tồn khi phê duyệt xây dựng, đáp ứng nhu cầu hiện đại mà không suy giảm giá trị văn hóa, lịch sử Thủ đô.

Nâng cao năng lực thể chế, điều phối liên ngành và huy động sự tham gia xã hội

Hệ thống pháp luật cần đi cùng bộ máy điều phối linh hoạt, cơ cấu rõ ràng, quy trình phối hợp hiệu quả và công cụ thực thi thích ứng. Quan hệ chặt chẽ giữa quy hoạch, kiến trúc, môi trường, hạ tầng và văn hóa - xã hội đòi hỏi chuyển từ quản lý phân ngành sang tích hợp theo lãnh thổ, chức năng đô thị.

Ứng dụng chuyển đổi số và công nghệ trong quản lý xây dựng đô thị

Chuyển đổi số cần bao quát thủ tục, chất lượng, giám sát thi công và quản lý sau đầu tư. Dữ liệu còn phân tán, thiếu chuẩn thống nhất và liên thông thành phố - cơ sở. Cần tích hợp GIS, BIM, IoT với dữ liệu quy hoạch, cấp phép, thi công, bảo trì và hồ sơ điện tử để hỗ trợ quyết định. Yêu cầu phát triển nền tảng, dữ liệu, năng lực quản lý số của Chương trình chuyển đổi số quốc gia cần được thực hiện đồng thời với hoàn thiện thể chế, tiêu chuẩn kỹ thuật, hạ tầng và năng lực cán bộ.

5. MỘT SỐ GIẢI PHÁP QUẢN LÝ NHÀ NƯỚC VỀ HOẠT ĐỘNG XÂY DỰNG TẠI TP HÀ NỘI THEO ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

5.1. Hoàn thiện thể chế, chính sách và công cụ quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng đô thị

Thứ nhất, xem xét hoàn thiện quy định kiến trúc, không gian, cảnh quan và chỉ tiêu xây dựng theo từng khu vực. Chỉ xem xét điều chỉnh cục bộ quy hoạch sau đánh giá đầy đủ tác động hạ tầng, dân số, môi trường. Công trình cao tầng, hỗn hợp, tầng hầm sâu hoặc tại nơi đông dân, quá tải hạ tầng phải chịu tiêu chí kiểm soát chặt hơn. Chuẩn hóa thủ tục, kiểm tra, hậu kiểm, giảm hồ sơ trùng dữ liệu, thống nhất mẫu biểu xã, phường và gắn thời hạn với trách nhiệm giải trình.

Thứ hai, có thể lập, cập nhật danh mục kiểm soát đặc biệt tại nơi ven sông, hồ, nguy cơ ngập, mật độ cao, đang cải tạo hạ tầng. Công trình có khả năng tăng tải hạ tầng hoặc tác động lớn đến môi trường phải được thẩm tra, kiểm tra thực địa trước cấp phép. Hậu kiểm nên theo rủi ro. Có thể công khai quy hoạch, chỉ tiêu kiến trúc, điều kiện cấp phép, pháp lý và tiến độ hồ sơ. Cần công khai xử phạt, cưỡng chế, kết quả khắc phục vi phạm và danh mục dự án điều chỉnh quy hoạch, chủ trương đầu tư, giấy phép để cộng đồng giám sát.

Thứ ba, xem xét đưa tiết kiệm năng lượng, quản lý nước mưa, vật liệu xanh, tái chế chất thải xây dựng và không gian xanh vào điều kiện thẩm định, chấp thuận, cấp phép nhóm dự án phù hợp. Công trình, hạ tầng tại nơi nguy cơ ngập, nắng nóng cực đoan, quá tải thoát nước phải đáp ứng yêu cầu chống chịu khí hậu. Gắn trách nhiệm chủ đầu tư và hậu kiểm với chỉ tiêu môi trường, hạ tầng, cam kết phát triển xanh trong thi công, vận hành.

Thứ tư, liên thông dữ liệu quy hoạch, đất đai, cấp phép, môi trường, hạ tầng, vi phạm. Mỗi công trình, dự án phải có mã định danh xuyên suốt vòng đời và hồ sơ số cập nhật điều chỉnh, kiểm tra, thanh tra, xử lý, khắc phục vi phạm. Dữ liệu tích hợp hỗ trợ cảnh báo chậm tiến độ, điều chỉnh nhiều lần, nguy cơ vi phạm và lựa chọn đối tượng kiểm tra, giám sát.

Thứ năm, định kỳ không quá sáu tháng, Thành phố cần rà soát vướng mắc giữa thành phố và xã, phường trong chính quyền hai cấp. Sửa ngay quy trình, quy định thuộc thẩm quyền khi phát hiện bất cập. Có thể thí điểm công cụ tại phường chịu áp lực xây dựng cao, đánh giá trước khi nhân rộng. Điều chỉnh chính sách dựa trên thời gian xử lý hồ sơ, số vụ vi phạm, tỷ lệ khắc phục, số lần điều chỉnh quy hoạch và mức hài lòng của người dân, doanh nghiệp.

5.2. Kiện toàn tổ chức bộ máy và nâng cao năng lực thực thi trong quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng đô thị

Trong mô hình chính quyền địa phương hai cấp, Thành phố cần xác định đầu mối và cơ chế phối hợp về quy hoạch, cấp phép, trật tự xây dựng, chất lượng công trình và dữ liệu. Mỗi nhiệm vụ phải rõ cơ quan chủ trì, trách nhiệm chính và trách nhiệm xử lý cuối cùng. Xã, phường đô thị hóa nhanh, mật độ xây dựng cao hoặc thường phát sinh vi phạm cần bộ phận chuyên trách đủ nhân lực, chuyên môn, tránh kiêm nhiệm dàn trải.

Về đội ngũ, xem xét xây dựng khung năng lực theo vị trí, bao gồm chuyên môn, kinh nghiệm, kiểm tra hiện trường, xử lý tình huống và kỹ năng số. Có thể bồi dưỡng định kỳ qua tình huống cấp phép, chất lượng, vi phạm, tranh chấp. Cán bộ xã, phường cần chú trọng phát hiện sớm vi phạm, lập hồ sơ, áp dụng biện pháp xử lý, phối hợp chuyên môn và cập nhật dữ liệu. Đánh giá cán bộ phải chủ yếu dựa trên kết quả, tiến độ và chất lượng đầu ra.

Về trách nhiệm công vụ, phải xác định trách nhiệm cá nhân từng hồ sơ, khâu xử lý và vụ việc, kể cả chậm giải quyết, tham mưu sai, bỏ lọt hoặc xử lý không dứt điểm vi phạm. Thành phố xem xét kiểm tra nội bộ khâu thẩm định, cấp phép, kiểm tra hiện trường và xử lý vi phạm. Kết quả phải được dùng để chấn chỉnh công vụ, điều chỉnh quy trình và xử lý trách nhiệm.

Về phối hợp, có thể liên thông cơ quan chuyên môn Thành phố với UBND xã, phường trong vụ việc liên quan quy hoạch, đất đai, môi trường, hạ tầng và trật tự xây dựng. Quy trình trao đổi, đầu mối tiếp nhận, thời hạn phản hồi và trách nhiệm cung cấp dữ liệu phải thống nhất. Cơ quan chuyên môn thành phố xem xét hỗ trợ kịp thời vụ việc phức tạp, vượt năng lực cơ sở, bảo đảm xã, phường chủ động thực hiện nhiệm vụ phân cấp và quản lý thống nhất.

5.3. Nâng cao chất lượng quy hoạch và quản lý thực hiện quy hoạch xây dựng đô thị

Thứ nhất, nâng cao chất lượng lập quy hoạch. Thành phố xem xét rà soát đồ án, phân loại còn phù hợp, cần điều chỉnh hoặc lập mới. Ưu tiên nơi đô thị hóa nhanh, điều chỉnh nhiều lần, chịu áp lực dân số, hạ tầng và dịch vụ công, xác định quy hoạch chồng lấn, mâu thuẫn chỉ tiêu, thiếu chi tiết hoặc không phù hợp thực tế. Kiểm tra thống nhất quy hoạch chung, phân khu, chi tiết và chương trình phát triển đô thị theo chức năng đất, dân số, mật độ, tầng cao, hệ số sử dụng đất, hạ tầng. Không phê duyệt quy hoạch cấp dưới khi mâu thuẫn cấp trên hoặc chưa rõ khả năng đáp ứng của hạ tầng kỹ thuật, xã hội. Quy hoạch giáp ranh phải bảo đảm kết nối liên địa bàn. Dự báo cần dựa trên dữ liệu dân số, đất đai, nhà ở, giao thông, môi trường, tính đến dân số cơ học và nhu cầu hạ tầng. Đồ án phải giới hạn xây dựng theo sức chịu tải, xác định chỉ tiêu tiết kiệm đất, mật độ, bảo vệ mặt nước, cây xanh, không gian công cộng và chống chịu khí hậu làm căn cứ quản lý dự án, cấp phép.

Thứ hai, kiểm soát điều chỉnh và thực hiện quy hoạch. Hồ sơ phải thể hiện phương án trước, sau và tác động đến dân số, hạ tầng, cảnh quan, môi trường, nhất là khi thay đổi chức năng đất, mật độ, tầng cao, hệ số sử dụng đất. Không xem xét điều chỉnh nếu hạ tầng hết khả năng đáp ứng hoặc chưa rõ nguồn lực, tiến độ bổ sung. Hạn chế điều chỉnh cục bộ vì lợi ích ngắn hạn, không phá cấu trúc không gian, tăng áp lực hạ tầng hay giảm đất giao thông, cây xanh, công trình công cộng, hạ tầng xã hội. Dự án tăng quy mô phải xác định trách nhiệm bổ sung hạ tầng. Điều chỉnh ảnh hưởng lớn đến cộng đồng, không gian đô thị cần lấy ý kiến trước quyết định. Cấp phép, chấp thuận đầu tư và triển khai phải theo quy hoạch, không điều chỉnh để hợp thức hóa vi phạm. UBND xã,

phường thường xuyên theo dõi chức năng sử dụng, mật độ, tầng cao, chỉ giới và chuyển công năng. Cơ quan chuyên môn thành phố hậu kiểm dự án lớn, nơi phát triển nhanh, điều chỉnh nhiều lần và vụ việc vượt năng lực cơ sở.

Thứ ba, công khai và tăng giám sát. Có thể công bố đồ án, chỉ tiêu, quyết định và nội dung điều chỉnh trên nền tảng chung, gồm pháp lý, bản đồ trực quan, bảo đảm dễ tra cứu, đọc hiểu và sử dụng. Công khai phương án trước, sau điều chỉnh, lý do, căn cứ pháp lý, tác động dự kiến và thường xuyên cập nhật danh mục dự án điều chỉnh. Thành phố xem xét thiết lập kênh phản ánh có mã tiếp nhận, cơ quan xử lý, thời hạn, kết quả. Vi phạm xây dựng có thể chuyển UBND xã, phường kiểm tra hiện trường. Nội dung về đồ án, quyết định điều chỉnh chuyển cơ quan chuyên môn thành phố. Kết quả phải phản hồi người gửi, công khai vụ việc ảnh hưởng cộng đồng.

Thứ tư, quản lý bằng dữ liệu số. Thành phố xem xét xây dựng dữ liệu quy hoạch thống nhất, liên thông đất đai, cấp phép, hạ tầng, dân cư, môi trường, vi phạm. Mỗi đồ án, khu đất, dự án cần mã định danh từ phê duyệt đến triển khai, cập nhật ngay khi phê duyệt hoặc điều chỉnh. Giao rõ trách nhiệm cập nhật, kiểm tra, xác nhận dữ liệu. Cơ quan chuyên môn thành phố quản lý dữ liệu gốc, chuẩn hóa, kiểm soát thống nhất. UBND xã, phường cập nhật thực hiện, biến động xây dựng và vi phạm. GIS, bản đồ số, mô hình không gian, giám sát trực tuyến cần đối chiếu hiện trạng với quy hoạch, cảnh báo sai chỉ tiêu, công năng hoặc vượt tải hạ tầng. Khu vực tăng mật độ bất thường, quá tải giao thông, thiếu không gian công cộng, xung đột sử dụng đất cần tự động đưa vào diện kiểm tra trọng điểm.

5.4. Thúc đẩy ứng dụng khoa học - công nghệ và chuyển đổi số trong quản lý hoạt động xây dựng đô thị

Thứ nhất, hoàn thiện dữ liệu số. Thành phố có thể xây dựng cơ sở dữ liệu thống nhất về quy hoạch, đất đai, cấp phép, chất lượng công trình, hạ tầng, môi trường và vi phạm. Phải chuẩn hóa biểu mẫu, cấu trúc, chế độ cập nhật và cấp mã định danh cho mỗi công trình xuyên suốt vòng đời.

Thứ hai, số hóa quy trình. Có thể thống nhất tiếp nhận, thẩm định, cấp phép, kiểm tra, xử lý vi phạm trên môi trường điện tử. Hồ sơ phải rõ cơ quan, cán bộ chịu trách nhiệm, thời hạn và trạng thái giải quyết. Tái sử dụng dữ liệu để hạn chế yêu cầu người dân, doanh nghiệp cung cấp nhiều lần.

Thứ ba, giám sát theo rủi ro. Có thể dùng GIS, bản đồ số, viễn thám, thiết bị bay không người lái và giám sát trực tuyến để phát hiện sớm sai phép, vượt tầng cao, mật độ, chỉ giới. Hệ thống phải cảnh báo điều chỉnh hồ sơ nhiều lần, chậm tiến độ, thiếu nghĩa vụ hạ tầng, môi trường, giúp tập trung kiểm tra đối tượng nguy cơ cao.

Thứ tư, ứng dụng công nghệ chuyên sâu. Có thể mở rộng BIM trong thẩm định thiết kế, quản lý dự án, tiến độ và thay đổi công trình. AI có thể phân loại hồ sơ, nhận diện sai lệch, dấu hiệu vi phạm. Việc áp dụng phải có lộ trình thử nghiệm, kiểm chứng và không thay thế trách nhiệm quyết định của cơ quan quản lý.

Thứ năm, khai thác môi trường dữ liệu chung (Common Data Environment - CDE). Với dự án BIM, CDE nên là nguồn thông tin thống nhất phục vụ thẩm định, cấp phép, giám sát thi công, nghiệm thu, vận hành và kiểm tra. Thành phố xem xét quy định quyền truy cập, trách nhiệm cập nhật, trạng thái thông tin, kiểm soát phiên bản, an toàn dữ liệu và kết nối với hệ thống quản lý nhà nước. CDE giúp giảm trùng hồ sơ, bảo đảm nhất quán và nâng hiệu quả phối hợp, giám sát, ra quyết định.

Thứ sáu, nâng năng lực số. Thành phố xem xét đào tạo theo vị trí về dữ liệu, GIS, BIM, hồ sơ điện tử và nền tảng giám sát. Xem xét quy chế cập nhật, khai thác, chia sẻ dữ liệu, xác định trách nhiệm cơ quan, cá nhân. Chất lượng và tính kịp thời của dữ liệu phải là tiêu chí đánh giá nhiệm vụ.

6. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy quản lý nhà nước về hoạt động xây dựng tại Hà Nội có thể được đổi mới theo hướng tích hợp, chủ động và phù hợp hơn với yêu cầu phát triển bền vững. Các giải pháp được đề xuất tập trung vào hoàn thiện cơ chế quản lý, nâng cao năng lực thực thi, tăng cường kiểm soát quy hoạch và ứng dụng công nghệ, qua đó góp phần nâng cao hiệu lực quản lý trong điều kiện đô thị hóa nhanh và vận hành mô hình chính quyền địa phương hai cấp.

Tuy vậy, nghiên cứu mới tập trung đề xuất các giải pháp ở cấp độ quản lý chung của Thành phố, chưa đi sâu làm rõ điều kiện và lộ trình áp dụng đối với từng khu vực đô thị. Các nghiên cứu tiếp theo có thể cụ thể hóa cơ chế thực hiện, nguồn lực bảo đảm và trách nhiệm phối hợp giữa cấp thành phố với cấp xã, phường trong mô hình chính quyền địa phương hai cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Cơ quan Hợp tác Phát triển Italia và Tổng cục Thống kê. Một số chỉ tiêu phát triển bền vững về môi trường đô thị và biến đổi khí hậu tại Việt Nam năm 2021, 2023.

[2] Cục Thống kê TP Hà Nội. Báo cáo tình hình kinh tế - xã hội quý IV và năm 2024, Hà Nội, 2025.

[3] Trần Thị Thanh Mai. Quản lý nhà nước về xây dựng đô thị ở Việt Nam hiện nay. Luận án tiến sĩ, Học viện Hành chính Quốc gia, Hà Nội, 2020.

[4] Lê Minh Thoa. Quản lý đầu tư phát triển đô thị xanh ở TP Hà Nội. Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học xã hội, Hà Nội, 2019.

[5] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 ngày 10/12/2025, 2025.

[6] Quốc hội. Luật Thủ đô số 02/2026/QH16 ngày 23/4/2026, 2026.

[7] 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.

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 258/QĐ-TTg ngày 17/3/2023 phê duyệt Lộ trình áp dụng mô hình thông tin công trình (BIM) trong hoạt động xây dựng, 2023.

[9] 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, 2024a.

[10] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1668/QĐ-TTg ngày 27/12/2024 phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch chung Thủ đô Hà Nội đến năm 2045, tầm nhìn đến năm 2065, 2024b.

[11] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision - Key Facts, Department of Economic and Social Affairs, New York, 2018.

[12] United Nations. Sustainable Development Goal 11: Make Cities Inclusive, Safe, Resilient and Sustainable, United Nations, New York, 2023.

■Ngày nhận bài: 10/8/2026 ■Ngày sửa bài: 20/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/9/2026

Quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách nhà nước

Risk management during the construction phase of hospital projects funded by non-state budget sources

> THS.NCS BÙI VĂN NHẬT[1,2,3,*], PGS.TS NGUYỄN ANH THƯ[1,2]
[1]Bộ môn Thi công & Quản lý xây dựng, Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM
[2]Đại học Quốc gia TP.HCM
[3]Công ty Cổ phần Đầu tư Xây dựng Coficons
[*]Email: vannhat.qlda.tci@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu và đánh giá về khả năng xảy ra và mức độ ảnh hưởng của các rủi ro xảy ra ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách nhà nước tại Việt Nam. Bài báo tập trung vào bốn nhóm rủi ro chính gồm: Rủi ro về chi phí, rủi ro về chất lượng, rủi ro về xã hội và rủi ro về tiến độ. Bên cạnh việc xác định các rủi ro thường xảy ra và đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng, tác giả còn đề xuất các giải pháp ứng phó và phòng ngừa các rủi ro ở giai đoạn thi công đối với dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách nhà nước.

Từ khóa: Bệnh viện vốn ngoài ngân sách; bệnh viện vốn tư nhân; rủi ro dự án bệnh viện; đầu tư bệnh viện tư nhân; rủi ro dự án thi công xây dựng.

ABSTRACT

This study investigates and evaluates the likelihood of occurrence and the impact severity of risks arising during the construction phase of hospital projects financed by non-state budget funds in Vietnam. The research focuses on four major categories of construction risks, namely cost risks, quality risks, social risks, and schedule risks. In addition to identifying the most frequently occurring risks and assessing their levels of impact, the study proposes appropriate mitigation and preventive measures to effectively manage risks during the construction phase of hospital projects funded by non-state budget sources.

Keywords: Non-state budget-funded hospitals; privately funded hospitals; hospital project risks; private investment in hospital development; construction project risks.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sau khi đạt được những thành tựu nhất định trong quá trình hội nhập kinh tế quốc tế, đặc biệt là việc gia nhập Tổ chức Thương mại Thế giới (WTO) ngày 11/01/2007 và đảm nhiệm vai trò Chủ tịch ASEAN lần thứ ba vào năm 2020, nền kinh tế Việt Nam đã không ngừng phát triển, mở rộng về quy mô và đa dạng hóa các lĩnh vực hoạt động, với sự tham gia của nhiều thành phần trong xã hội.

Ngày 30/04/2025, Tổng Bí thư Tô Lâm đã nhấn mạnh định hướng đưa đất nước bước vào kỷ nguyên vươn mình của dân tộc. Định hướng này đặt ra yêu cầu huy động và sử dụng hiệu quả các nguồn lực nhằm thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội, nâng cao chất lượng đời sống nhân dân và hiện thực hóa các mục tiêu phát triển đất nước trong giai đoạn tiếp theo. Trong bối cảnh đó, chính sách đầu tư theo phương thức đối tác công - tư (PPP) được khuyến khích trên cả nước, về các lĩnh vực: y tế, giáo dục và hạ tầng kỹ thuật. Và khối y tế, với các dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách được lựa chọn là ưu tiên hàng đầu để chăm lo đời sống sức khỏe của người dân.

Chính vì vậy, với mục đích khắc phục triệt để thực trạng những rủi ro tiềm ẩn và tìm ra giải pháp mang đến sự hiệu quả trong thực tế đầu tư các bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách mà các nghiên cứu trước đó còn thiếu sót, tác giả thực hiện nghiên cứu này để xác định các danh mục rủi ro xảy ra và đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng ở giai đoạn thi công của dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách. Từ đó, đưa ra kết luận và đề xuất các giải pháp nhằm đo lường, phòng ngừa và ứng phó kịp thời các rủi ro ảnh hưởng đến mục tiêu của các dự án xây dựng bệnh viện nói chung và dự án xây dựng bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách nói riêng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ QUẢN LÝ RỦI RO Ở GIAI ĐOẠN THI CÔNG DỰ ÁN BỆNH VIỆN SỬ DỤNG NGUỒN VỐN NGOÀI NGÂN SÁCH NHÀ NƯỚC

2.1. Định nghĩa về rủi ro ở các lĩnh vực

Rủi ro trong đời sống thường ngày là những việc làm, những sự vật/ sự việc xảy ra nằm ngoài dự định của con người.

Rủi ro trong lĩnh vực y tế là số bệnh nhân tăng lên ngoài kế hoạch dự kiến dẫn đến thiếu đội ngũ y bác sĩ khám chữa bệnh, hay chi phí phải thanh toán cho việc đầu tư xây dựng bệnh viện vượt so với kế hoạch ngân sách ban đầu.

Rủi ro trong lĩnh vực thi công xây dựng là dự án xảy ra nhiều sự cố dẫn đến công trình bị kém chất lượng, tiến độ thi công kéo dài, phát sinh nhiều chi phí so với kế hoạch ban đầu của dự án.

2.2. Định nghĩa rủi ro trong nghiên cứu này

Rủi ro ở giai đoạn thi công xây dựng dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách là khả năng có thể xảy ra và mức độ ảnh hưởng của một hay nhiều sự việc nằm ngoài kế hoạch ban đầu của dự án về chi phí, chất lượng, tiến độ, xã hội,… mà chúng ta hoàn toàn không đo lường trước được ảnh hưởng đến hiệu quả đầu tư xây dựng dự án bệnh viện sử dụng nguồn ngoài ngân sách.

2.3. Các nghiên cứu tương tự đã công bố

Bảng 1. Các nghiên cứu tương tự đã công bố

TT	Tên bài báo	Năm công bố	Nội dung chính	Kết quả	Ưu điểm	Hạn chế	Đóng góp
1	Các rủi ro ảnh hưởng đáng kể trong dự án xây dựng theo nhận thức của nhà thầu thi công tại Malaysia của **Nur Alkaf Karim và Rahman Hameed Memon**	2012	Bài báo đã liệt kê ra 25 rủi ro phổ biến được phân loại trong 5 loại, được xác định thông qua các tác phẩm văn học bằng việc sử dụng bảng khảo sát và gửi tới 74 nhà thầu và 100 người có thâm niên làm việc từ 5 đến hơn 15 năm.	Nghiên cứu đã chỉ ra 05 rủi ro quan trong nhất trong dự án thi công xây dựng là: thiếu nguyên liệu, chậm trễ giao vật liệu, thiếu ứng dụng khoa học công nghệ kỹ thuật vào xây dựng, chất lượng tay nghề kém và khó khăn về dòng tiền.	Nhận dạng được các rủi ro ở vai trò là nhà thầu thi công.	Chưa đưa ra được cụ thể về mức độ ảnh hưởng và đề xuất được các giải pháp phòng ngừa, khắc phục.	Bài báo chỉ ra được 05 rủi ro của nhà thầu thi công thường hay gặp phải trong thi công xây dựng để có thể lên kế hoạch quản lý rủi ro trước khi thi công.
2	Các yếu tố ảnh hưởng đến giá trị dòng tiền có thể thu được của các dự án chăm sóc sức khỏe được tài trợ tư nhân với hợp đồng hợp tác công tư (PPP) tại Vương quốc Anh của **Alberto De Marco.**	2013	Nghiên cứu được khảo sát dựa trên bộ dữ liệu gồm 49 dự án với các khoản thanh toán được báo cáo hằng năm trong vòng đời của chúng từ năm 1992 đến 2060. Toàn bộ khoản đầu tư có tổng trị giá là 2.575,5 triệu bảng Anh và quy mô trung bình mỗi dự án là 52,57 triệu bảng Anh.	Nghiên cứu chỉ ra các yếu tố rủi ro chính ảnh hưởng đến dự án bệnh viện PPP/PFI là tài chính, chính trị, kinh tế, thi công xây dựng và thị trường.	Nghiên cứu chỉ ra các yếu tố rủi ro chính ảnh hưởng đến dự án bệnh viện PPP/PFI.	Chưa đưa ra được cụ thể về mức độ ảnh hưởng và đề xuất được các giải pháp phòng ngừa, khắc phục.	Bài báo nêu ra các rủi ro chính ảnh hưởng đến dự án bệnh viện PPP/PFI để các nhà đầu tư có giải pháp phòng tránh.
3	Cuộc khảo sát toàn diện và thí nghiệm chuyên môn của các chuyên gia trong lĩnh vực xây dựng tại Hàn Quốc của **Pejman Rezakhani**	2012	Cuộc khảo sát đưa ra 26 yếu tố rủi ro khác nhau ảnh hưởng đến việc thi công xây dựng một dự án xây dựng và được phân loại thành 08 nhóm ảnh hưởng chính: (1) Không có kế hoạch tổng thể dự án; (2) Thiếu thông tin dự án; (3) Tổ chức bộ máy yếu kém; (4) Nhà thầu không đủ năng lực tài chính; (5) Quản lý chi phí kém; (6) Quản lý tiến độ kém; (7) Quản lý chất lượng kém; (8) Thay đổi phạm vi công việc.	Nghiên cứu đã chỉ ra rằng bằng cách sử dụng phân tích rủi ro phân cấp được đề xuất, hầu hết các rủi ro trong các dự án thường xuyên và phức tạp đều được bảo hiểm và kết quả là một kế hoạch quản lý rủi ro hiệu quả có thể được thực hiện.	Nhận dạng được các rủi ro trong thi công xây dựng.	Chưa đưa ra được cụ thể về mức độ ảnh hưởng và đề xuất được các giải pháp phòng ngừa, khắc phục.	Bài báo chỉ ra được các rủi ro thường hay gặp phải trong thi công xây dựng để có thể lên kế hoạch quản lý rủi ro trước khi thi công.
4	Các rủi ro ảnh hưởng đến dự án thi công xây dựng thông qua việc dữ liệu thu thập được từ các hồ sơ lịch sử mà nhà thầu có kinh nghiệm trong các dự án ở quá khứ tại **Trường Đại học California - Hoa Kỳ, Jamal F. Al-Bahar và Keith C. Crandall**	1990	Nghiên cứu đã chỉ ra được 06 rủi ro ảnh hưởng đến dự án thi công xây dựng: (1) Thời tiết; (2) Tài chính và kinh tế; (3) Thiết kế; (4) Chính trị; (5) Vệ sinh môi trường; (6) Thi công xây dựng; bằng mô hình mang tên Hệ thống quản lý rủi ro xây dựng (CRMS).	Nghiên cứu đã chỉ ra được 06 rủi ro ảnh hưởng đến dự án thi công xây dựng: (1) Thời tiết; (2) Tài chính và kinh tế; (3) Thiết kế; (4) Chính trị; (5) Vệ sinh môi trường; (6) Thi công xây dựng.	Nhận dạng được các rủi ro trong thi công xây dựng.	Chưa đưa ra được cụ thể về mức độ ảnh hưởng và đề xuất được các giải pháp phòng ngừa, khắc phục.	Bài báo áp dụng được mô hình CRMS là sự thay thế hợp lý cho phương pháp tiếp cận phí hệ thống hiện đang được hầu hết các nhà thầu sử dụng. Kỹ thuật lập sơ đồ ảnh hưởng và mô phỏng Monte Carlo được dùng làm công cụ phân tích và đánh giá rủi ro.

Hầu hết các nghiên cứu trong nước và ngoài nước trước đây đều nghiên cứu về rủi ro ở các dự án xây dựng dân dụng và công nghiệp, hoặc hạ tầng kỹ thuật. Chỉ có duy nhất 01 trong 04 nghiên cứu được nêu ra là nói đến dự án về y tế, và cũng chỉ dừng lại ở quy mô khá bé là phòng khám sức khỏe sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách (hình thức hợp đồng PPP). Chính vì vậy, nghiên cứu này tác giả mong muốn quản lý rủi ro ở tầm tương đối vĩ mô về loại hình dự án và cả nguồn vốn cũng ít khi được nghiên cứu đến. Đó là "Quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện sử dụng nguồn vốn ngoài ngân sách".

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ BẢNG BIỂU, HÌNH

3.1. Xác định vấn đề nghiên cứu

Ngành Xây dựng thường có nhiều rủi ro hơn so với các hoạt động kinh doanh khác vì sự phức tạp trong việc điều phối các hoạt động khác nhau. Các dự án xây dựng dân dụng và công nghiệp đơn thuần được đầu tư bởi nguồn vốn ngân sách nhà nước nghĩ là đơn giản nhất, nhưng cũng không kém phần phức tạp và liên quan đến nhiều quá trình phản hồi từ các bên tham gia. Những người tham gia khác nhau với kinh nghiệm và kỹ năng khác nhau thường có

những kỳ vọng và sở thích khác nhau. Điều này có nguy cơ tiềm ẩn rất nhiều rủi ro ảnh hưởng đến mục tiêu của dự án, ngay cả các nhà quản lý dự án và nhà thầu đã có nhiều kinh nghiệm

Tác giả lựa chọn giai đoạn thi công xây dựng dự án là giai đoạn có thể tiềm ẩn nhiều khả năng xảy ra rủi ro và mức độ ảnh hưởng của nó.

Hình 1. Sơ đồ giai đoạn nghiên cứu

3.2. Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Ở nghiên cứu này tác giả muốn tạo nên cái mới trong lĩnh vực Quản lý rủi ro trong xây dựng bằng việc mạnh dạn đi sâu hơn nữa về cái mới với việc lựa chọn đề tài nghiên *"Quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công xây dựng dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách"* tại Việt Nam. Với các mục tiêu nghiên cứu được đặt ra như sau:

- Nhận diện các rủi ro xảy ra ở giai đoạn thi công xây dựng.
- Phân tích, đánh giá tần suất, xác định mức độ ảnh hưởng của nó.
- Xây dựng các biện pháp nhằm ứng phó, ngăn chặn, phòng ngừa, giảm thiểu, chuyển giao hoặc gánh chịu. Từ đó đưa ra các kết luận và kiến nghị.

3.3. Thiết kế bảng câu hỏi để xác định tần suất và mức độ ảnh hưởng

Để xác định khả năng xảy ra của các rủi ro, tác giả xây dựng bảng câu hỏi bao gồm các mức độ:

Rất ít khi xảy ra	Ít khi xảy ra	Thỉnh thoảng xảy ra	Thường xuyên xảy ra	Luôn luôn xảy ra
1	2	3	4	5

Và để xác định mức độ ảnh hưởng của những rủi ro, tác giả xây dựng bảng câu hỏi bao gồm các mức độ như sau:

Ảnh hưởng rất ít	Ảnh hưởng ít	Ảnh hưởng trung bình	Ảnh hưởng nhiều	Ảnh hưởng rất nhiều
1	2	3	4	5

Và tác giả áp dụng các công cụ nghiên cứu như sau:

Bảng 2. Công cụ nghiên cứu được áp dụng

Công việc	Công cụ nghiên cứu
Thu thập dữ liệu.	Bảng câu hỏi khảo sát.
Mô tả dữ liệu.	Thống kê mô tả.
Kiểm duyệt dữ liệu, kiểm tra độ tin cậy của thang đo	Hệ số Conbach's Alpha.
Xếp hạng các rủi ro.	Trị trung bình MEAN.
Đánh giá sự khác biệt các nhóm tổng thể về trị trung bình.	Kiểm định phi tham số Kruskal-Wallis.
Rút gọn dữ liệu, nhóm các biến có liên hệ với nhau thành nhân tố chính.	Phân tích thành tố chính PCA.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Kết quả thu thập dữ liệu

Sau hơn 02 tháng, có tất cả 127 được xem là đáp ứng điều kiện về kích thước mẫu như đã dự kiến từ 100 đến 125 mẫu. Từ đó, tác giải thống nhất lựa chọn ra 06 biến thông tin chung được đặt tên Mã biến theo Bảng 3.

Bảng 3. Mã các biến thông tin chung

Mã	Tên thông tin biến	1	2	3	4
BTG	Bên tham gia	CĐT	Tư vấn	Nhà thầu	Khác
KN	Kinh nghiệm công tác	< 5 năm	5-10 năm	10-15 năm	>15 năm
BV	Tham gia dự án bệnh viện	Có	Không		
VNNS	Tham gia dự án vốn ngoài ngân sách	Có	Không		
BVVNNS	Tham gia dự án bệnh viện vốn ngoài ngân sách	Có	Không		
QM	Quy mô dự án	< 5 tỷ	5-10	10-50	>50 tỷ

Sau đó, tác giả tiến hành thống kê theo tỉ lệ % của từng biến, kiểm định sự khác biệt giữa các nhóm khảo sát đối với kết quả nghiên cứu so với các bên tham gia bằng Kruskal-Wallis để xác định tần suất xảy ra và Cronbach's Alpha để xác định trị trung bình của thang đo về mức độ ảnh hưởng và việc phân tích thành tố PCA. Từ đó đưa ra các kết luận và xếp hạng về 02 thông số "Tần suất xảy ra rủi ro và mức độ ảnh hưởng của rủi ro" nêu trong nghiên cứu.

Tất cả 25 rủi ro được xếp hạng đều có giá trị trung bình >3.000 nên thỏa mãn điều kiện nghiên cứu. Điều này giúp cho kết quả nhận định tần suất xảy ra rủi ro được chính xác hơn, góp phần nâng cao công tác quản lý chất lượng, tiến độ, chi phí và nâng cao hiệu quả dự án.

Bảng 4. Bảng tính trị trung bình và xếp hạng các yếu tố tần suất xảy ra rủi ro

STT	Tần suất xảy ra rủi ro ở giai đoạn thi công dự án Bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách	Mã biến	Mean	Xếp hạng
1	Thiếu cán bộ kỹ thuật và lao động lành nghề	CL1	3,50	13
2	Lỗi hoặc thiếu sót trong bản vẽ	CL2	3,55	10
3	Giám sát kém	CL3	3,45	16
4	Quan liêu	CL4	3,43	18
5	Thiếu ứng dụng công nghệ xây dựng	CL5	3,38	21
6	Quản lý điều hành kém	CL6	3,37	22
7	Thay đổi đơn hàng/ nguyên vật liệu thường xuyên từ chủ đầu tư	TD1	3,54	11
8	Không có kế hoạch tổng thể dự án	TD2	3,54	12
9	Thay đổi các điều khoản Hợp đồng (chậm trễ ký, thay đổi/ điều chỉnh, gia hạn, tranh chấp, kiện tụng,..)	TD3	3,58	7
10	Chậm trễ trong việc ra quyết định	TD4	3,58	8
11	Chậm trễ trong việc phản ứng của các nhà tư vấn đối với yêu cầu cấp thông tin (RFI)	TD5	3,60	5
12	Sự chậm trễ trong phê duyệt dự án và giấy phép	TD6	3,05	24
13	An toàn công trường không đảm bảo	TD7	3,62	3
14	Vật tư không điều hòa: Giao hàng trễ, thiếu sót	TD8	3,04	25
15	Giao tài liệu trễ	TD9	3,48	15

16	Thiếu máy móc, thiết bị	TD10	3,39	20
17	Thời tiết thay đổi (thiên tai, hạn hán, lũ lụt,..)	XH1	3,67	1
18	Ô nhiễm môi trường	XH2	3,55	9
19	Xã hội không ổn định (dịch bệnh, thảm họa, tai nạn,..)	XH3	3,60	6
20	Thay đổi luật pháp và chính sách (Thông tư, Nghị định, văn bản, chỉ thị,…)	XH4	3,65	2
21	Điều kiện về đất đai (pháp lý đất chưa hoàn chỉnh, đất bị thu hồi do quy hoạch,…)	XH5	3,61	4
22	Thay đổi phạm vi công việc	CP1	3,36	23
23	Nhà thầu chính chậm trễ thanh toán cho thầu phụ/ Nhà cung cấp	CP2	3,50	14
24	Chủ đầu tư chậm thanh toán cho nhà thầu	CP3	3,42	19
25	Kinh tế thị trường biến động (lạm phát, lãi suất,..)	CP4	3,45	17

Kết quả và thảo luận về mức độ ảnh hưởng của rủi ro theo bảng sau:

Bảng 5. Bảng tính trị trung bình và xếp hạng các yếu tố mức độ ảnh hưởng

STT	Mức độ ảnh hưởng của rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách	Mã biến	Mean	Xếp hạng
1	Thiếu cán bộ kỹ thuật và lao động lành nghề	CL1	3,50	14
2	Lỗi hoặc thiếu sót trong bản vẽ	CL2	3,54	8
3	Giám sát kém	CL3	3,46	17
4	Quan liêu	CL4	3,45	18
5	Thiếu ứng dụng công nghệ xây dựng	CL5	3,39	22
6	Quản lý điều hành kém	CL6	3,39	21
7	Thay đổi đơn hàng/ nguyên vật liệu thường xuyên từ chủ đầu tư	TD1	3,52	12
8	Không có kế hoạch tổng thể dự án	TD2	3,54	11
9	Thay đổi các điều khoản Hợp đồng (chậm trễ ký, thay đổi/ điều chỉnh, gia hạn, tranh chấp, kiện tụng,..)	TD3	3,57	7
10	Chậm trễ trong việc ra quyết định	TD4	3,58	6
11	Chậm trễ trong việc phản ứng của các nhà tư vấn đối với yêu cầu cấp thông tin (RFI)	TD5	3,60	5
12	Sự chậm trễ trong phê duyệt dự án và giấy phép	TD6	3,07	24
13	An toàn công trường không đảm bảo	TD7	3,62	3
14	Vật tư không điều hòa: Giao hàng trễ, thiếu sót	TD8	2,99	25
15	Giao tài liệu trễ	TD9	3,48	15
16	Thiếu máy móc, thiết bị	TD10	3,34	23
17	Thời tiết thay đổi (thiên tai, hạn hán, lũ lụt,..)	XH1	3,67	1
18	Ô nhiễm môi trường	XH2	3,54	9
19	Xã hội không ổn định (dịch bệnh, thảm họa, tai nạn,..)	XH3	3,54	10
20	Thay đổi luật pháp và chính sách (Thông tư, Nghị định, văn bản, chỉ thị,…)	XH4	3,65	2
21	Điều kiện về đất đai (pháp lý đất chưa hoàn chỉnh, đất bị thu hồi do quy hoạch,…)	XH5	3,61	4
22	Thay đổi phạm vi công việc	CP1	3,40	20
23	Nhà thầu chính chậm trễ thanh toán cho thầu phụ/ Nhà cung cấp	CP2	3,52	13
24	Chủ đầu tư chậm thanh toán cho nhà thầu	CP3	3,45	19
25	Kinh tế thị trường biến động (lạm phát, lãi suất,..)	CP4	3,47	16

4.2. Thảo luận về kết quả kiểm định thang đo - Kiểm định Cronbach's Alpha.

Trước khi phân tích nhân tố, để xác định độ tin cậy của bảng câu hỏi và dữ liệu thu được tác giả đã kiểm định độ tin cậy của thang đo 04 lần để loại từ 25 biến về 22 biến có độ tin cậy cao. Việc sử dụng hệ số tin cậy Cronbach's Alpha trước khi phân tích nhân tố EFA nhằm mục đích loại các biến không phù hợp vì các biến này có thể tạo ra các yếu tố giả. Thể hiện cụ thể ở bảng sau:

Bảng 6. Kết quả kiểm định Cronbach's Alpha lần 4

Reliability Statistics

Cronbach's Alpha	N of Items
,874	22

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
ChiPhi1	74,17	173,266	,312	,874
ChiPhi2	74,05	171,395	,409	,870
ChiPhi3	74,12	170,232	,416	,870
ChiPhi4	74,09	172,515	,352	,872
ChatLuong1	74,06	171,361	,475	,868
ChatLuong2	74,02	171,388	,461	,868
ChatLuong3	74,10	169,934	,511	,867
ChatLuong4	74,12	171,105	,485	,868
ChatLuong5	74,17	169,700	,504	,867
ChatLuong6	74,17	173,367	,400	,870
RuiRoXaHoi1	73,90	171,267	,530	,867
RuiRoXaHoi2	74,02	172,690	,446	,869
RuiRoXaHoi3	74,02	174,087	,371	,871
RuiRoXaHoi4	73,90	175,569	,365	,871
RuiRoXaHoi5	73,95	176,522	,312	,873
TienDo1	74,05	165,776	,602	,864
TienDo2	74,02	168,071	,540	,866
TienDo3	73,99	168,833	,533	,866
TienDo4	73,98	169,889	,478	,868
TienDo5	73,95	168,093	,563	,865
TienDo7	73,94	168,179	,543	,866
TienDo9	74,09	168,381	,484	,868

Qua kết quả kiểm định Cronbach's Alpha lần 4 ở bảng 6 trên cho thấy hệ số Cronbach's Alpha = 0,874 >0,8 là kết quả chấp nhận được nên thang đo đạt yêu cầu về độ tin cậy. Và tất cả các biến quan sát đều có hệ số tương quan tổng lớn hơn 0,3 là phù hợp.

Từ kết quả trên, 22 biến quan sát được chấp nhận sử dụng phân tích nhân tố PCA.

4.3. Thảo luận kết quả phân tích thành tố PCA như sau:

Giá trị Communalities là mức độ một yếu tố tương quan với tất cả các yếu tố khác. Các giá trị Communalities lớn thì tốt hơn. Nếu giá trị Communalities của một biến mang giá trị thấp (giữa 0,0-0,4), thì biến đó có dấu hiệu tải cùng lúc lên nhiều yếu tố. Trong bảng bên dưới, bạn nên xác định các giá trị thấp trong cột "Extraction". Giá trị thấp chỉ ra những ứng cử viên để loại bỏ sau khi bạn kiểm tra ma trận mẫu (pattern matrix) hoặc ma trận xoay (rotated component matrix). Tiêu chuẩn ngưỡng của giá trị Communalities > 0.4 là được chấp nhận. Nhìn kết quả trên ta thấy tất cả các biến đều được giữ lại.

Xét 22 biến quan sát đưa vào phân tích nhân tố:

Bảng 7. Kết quả phân tích thành tố PCA

KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,804
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	2752,834
	df	231
	Sig.	,000

Communalities

	Initial	Extraction
ChiPhi1	1,000	,562
ChiPhi2	1,000	,777
ChiPhi3	1,000	,884
ChiPhi4	1,000	,784
ChatLuong1	1,000	,741
ChatLuong2	1,000	,763
ChatLuong3	1,000	,808
ChatLuong4	1,000	,780
ChatLuong5	1,000	,794
ChatLuong6	1,000	,725
RuiRoXaHoi1	1,000	,856
RuiRoXaHoi2	1,000	,705
RuiRoXaHoi3	1,000	,524
RuiRoXaHoi4	1,000	,887
RuiRoXaHoi5	1,000	,768
TienDo1	1,000	,749
TienDo2	1,000	,817
TienDo3	1,000	,774
TienDo4	1,000	,680
TienDo5	1,000	,808
TienDo7	1,000	,769
TienDo9	1,000	,679

Có 04 nhóm nhân tố rủi ro ở giai đoạn thi công dự án Bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách bị ảnh hưởng ẩn phía sau 22 yếu tố được rút ra từ phân tích nhân tố được đặt tên. Thể hiện bảng sau:

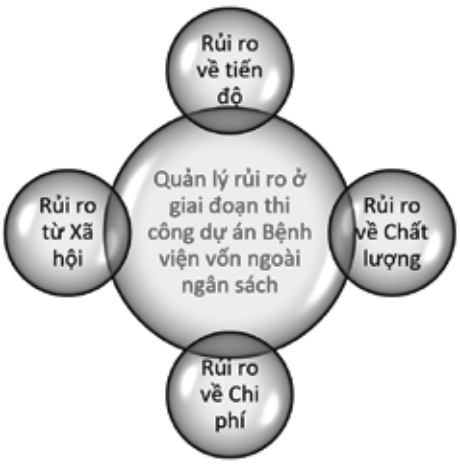
Bảng 8. Tổng hợp kết quả phân tích PCA

Mã biến	Yếu tố ảnh hưởng	Factor loading	Eigen value	% phương sai
TD	**Rủi ro về tiến độ dự án**		**5.278**	**23.991**
TienDo2	Không có kế hoạch tổng thể dự án	,901		
TienDo5	Chậm trễ trong việc phản ứng của các nhà tư vấn đối với yêu cầu cấp thông tin (RFI)	,889		
TienDo3	Thay đổi các điều khoản Hợp đồng (chậm trễ ký, thay đổi/ điều chỉnh, gia hạn, tranh chấp, kiện tụng,..)	,876		
TienDo7	An toàn công trường không đảm bảo	,868		
TienDo1	Thay đổi đơn hàng/ nguyên vật liệu thường xuyên từ chủ đầu tư	,844		
TienDo4	Chậm trễ trong việc ra quyết định	,822		
TienDo9	Giao tài liệu trễ	,821		
CL	**Chất lượng dự án**		**4.588**	**44.845**
ChatLuong3	Giám sát kém	,887		
ChatLuong5	Thiếu ứng dụng công nghệ xây dựng	,880		
ChatLuong4	Các hình thức quan liêu: tham nhũng, không tuân thủ,…	,874		
ChatLuong2	Lỗi hoặc thiếu sót trong bản vẽ	,863		
ChatLuong1	Thiếu cán bộ kỹ thuật và lao động lành nghề	,848		
ChatLuong6	Quản lý điều hành kém	,843		
XH	**Rủi ro xã hội**		**3.723**	**61.767**
RuiRoXaHoi4	Thay đổi luật pháp và chính sách (Thông tư, Nghị định, văn bản, chỉ thị,…)	,940		
RuiRoXaHoi1	Thời tiết thay đổi (thiên tai, hạn hán, lũ lụt,..)	,894		
RuiRoXaHoi5	Điều kiện về đất đai (pháp lý đất chưa hoàn chỉnh, đất bị thu hồi do quy hoạch,…)	,874		
RuiRoXaHoi2	Ô nhiễm môi trường	,808		
RuiRoXaHoi3	Xã hội không ổn định (dịch bệnh, thảm họa, tai nạn,..)	,702		
CP	**Chi phí dự án**		**3.046**	**75.614**
ChiPhi3	Chủ đầu tư chậm thanh toán cho nhà thầu	,930		
ChiPhi4	Kinh tế thị trường biến động (lạm phát, lãi suất,..)	,874		
ChiPhi2	Nhà thầu chính chậm trễ thanh toán cho thầu phụ/ Nhà cung cấp	,869		
ChiPhi1	Thay đổi phạm vi công việc	,727		

Theo đó, kết quả thỏa các điều kiện sau:

- Chỉ số KMO = 0,804 > 0,5 thỏa mãn.
- Bartlett's Test: Sig. = 0,000 < 0,05.
- Percentage of variance = 75,614% > 50%.
- Dựa vào đồ thị điểm gãy (ma trận xoay) hoặc Eigenvalues > 1 ta thấy có 04 nhóm nhân tố được tạo thành.

Nghiên cứu đã chỉ ra có Có 04 nhóm rủi ro ở giai đoạn thi công dự án Bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách ẩn phía sau 22 yếu tố bao gồm: (1) Chất lượng dự án; (2) Tiến độ dự án; (3) Rủi ro xã hội; (4) Chi phí dự án. Cụ thể:



Hình 2. Các thành tố rủi ro chính ở giai đoạn thi công xây dựng dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách

Nhân tố Tiến độ dự án giải thích 23,991% vấn đề nghiên cứu bao gồm các yếu tố: Không có kế hoạch tổng thể dự án; Chậm trễ trong việc phản ứng của các nhà tư vấn đối với yêu cầu cấp thông tin (RFI); Thay đổi các điều khoản Hợp đồng (chậm trễ ký, thay đổi/ điều chỉnh, gia hạn, tranh chấp, kiện tụng; An toàn công trường không đảm bảo; Thay đổi đơn hàng/ nguyên vật liệu thường xuyên từ chủ đầu tư; Chậm trễ trong việc ra quyết định; Giao tài liệu trễ.

Nhân tố Chất lượng dự án giải thích 44,845% vấn đề nghiên cứu bao gồm các yếu tố: Giám sát kém; Thiếu ứng dụng công nghệ xây dựng; Các hình thức quan liêu: tham nhũng, không tuân thủ; Lỗi hoặc thiếu sót trong bản vẽ; Thiếu cán bộ kỹ thuật và lao động lành nghề; Quản lý điều hành kém.

Nhân tố các rủi ro xã hội giải thích 61,767 % vấn đề nghiên cứu bao gồm các yếu tố rủi ro chính: Thay đổi luật pháp và chính sách (Thông tư, Nghị định, văn bản, chỉ thị,…); Thời tiết thay đổi (thiên tai, hạn hán, lũ lụt,..); Điều kiện về đất đai (pháp lý đất chưa hoàn chỉnh, đất bị thu hồi do quy hoạch,…); Ô nhiễm môi trường; Xã hội không ổn định (dịch bệnh, thảm họa, tai nạn,..) được thể hiện như sau:

Rủi ro về Nhân tố nhóm chi phí dự án giải thích được 75,614% vấn đề nghiên cứu, bao gồm các yếu tố: Chủ đầu tư chậm thanh toán cho nhà thầu; Kinh tế thị trường biến động (lạm phát, lãi suất,..); Nhà thầu chính chậm trễ thanh toán cho thầu phụ/ Nhà cung cấp; Thay đổi phạm vi công việc.

5. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP

Việc phân tích tần suất xảy ra và mức độ ảnh hưởng nhằm xác định được danh sách các rủi ro và mức độ ảnh hưởng của các rủi ro ở giai đoạn thi công xây dựng dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách. Qua đó, tác giả mong muốn các bên liên quan như: Chủ đầu tư, Tư vấn giám sát, tư vấn thiết kế, nhà thầu thi công và các cơ quan quản lý nhà nước liên quan có cái nhìn tổng thể rõ hơn về các rủi ro thường xảy ra trong giai đoạn thi công dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách và có sự phối hợp một cách hiệu quả nhất đối với công trình có tính chất đặc thù như ngành y tế nhằm giúp cho dự án hoàn thành đúng tiến độ, đạt chất lượng và chi phí theo kế hoạch.

Mặc dù, các kỹ thuật quản lý rủi ro cũng đã được phổ biến rất nhiều ở Việt Nam và các nước. Tuy nhiên, hầu hết các công ty xây dựng ở Việt Nam thời điểm hiện tại thường xuyên sử dụng phương pháp quản lý rủi ro định tính: dựa vào trực giác cá nhân, phán đoán và kinh nghiệm đã từng thực hiện các dự án tương tự để đánh giá rủi ro. Chỉ có một vài dự án kết hợp được cả phương pháp định tính và định lượng trong công tác quản lý rủi ro. Để giảm thiểu hoặc loại bỏ các rủi ro liên quan thì các nhà thầu thi công thường chuyển rủi ro sang các nhà thầu phụ hoặc mua các hợp đồng bảo hiểm chuyên nghiệp, nhà thầu chính sẽ là đơn vị quản lý dự án thi công chứ không trực tiếp triển khai.

Quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách là giải pháp mang tính toàn diện và có hệ thống nhằm đạt được mục tiêu của dự án. Hiểu được tính cấp thiết của quản lý rủi ro ở giai đoạn thi công dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách đối với sự thành công của dự án, tác giả đã mạnh dạn đề xuất 06 giải pháp như sau:

- Giải pháp 1: Thiết lập kế hoạch tổng thể dự án
- Giải pháp 2: Lựa chọn nhà thầu/ NCC kịp thời, hiệu quả
- Giải pháp 3: Xây dựng kế hoạch chi phí cho dự án
- Giải pháp 4: Xây dựng quy trình phối hợp giữa các bên tham gia dự án
- Giải pháp 5: Thiết lập Ban quản lý dự án thi công tại công trường
- Giải pháp 6: Tổ chức họp giao ban công trường định kỳ 01 tuần/ lần.

6. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Nghiên cứu đã đưa ra được danh sách các rủi ro thường xảy ra và mức độ ảnh hưởng của các rủi ro trong giai đoạn thi công dự án bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách.

Nghiên cứu này đã cho thấy có sự khác biệt ở nhóm tham gia dự án bệnh viện vốn ngoài ngân sách và nhóm chưa tham gia dự án bệnh viện vốn ngoài ngân sách, cơ bản vì dự án bệnh viện có tính chất đặc thù của ngành y tế nên có sự tham gia của rất nhiều đơn vị chuyên môn như: sàn chì, cách âm, cách nhiệt, hệ thống khí y tế, kháng khuẩn - vô trùng, xử lý chất thải y tế,...

Tác giả đánh giá tần suất xảy ra và mức độ ảnh hưởng của rủi ro ở giai đoạn thi công công dự án Bệnh viện nguồn vốn ngoài ngân sách ở mức độ số liệu dựa theo kinh nghiệm định tính và chưa có thêm số liệu định lượng cụ thể. Chính vì vậy, tác giả mong muốn ở nghiên cứu tiếp theo sẽ lấy cơ sở số liệu ở các dự án bệnh viện cụ thể đã thực hiện và các chuyên gia khảo sát là người trực tiếp quản lý điều hành các dự án này để tế nắm rõ các bất cập, các vấn đề nội tại xảy ra với dự án thì kết quả nghiên cứu sẽ tin cậy và thuyết phục hơn. Từ đó có thể lập trình viết ra và đưa vào vận hành các chương trình phần mềm quản trị rủi ro trong việc đầu tư xây dựng dự án bệnh viện từ sử dụng nguồn vốn trong và ngoài ngân sách nhà nước từ giai đoạn khởi đầu đến kết thúc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1] Pejman Rezakhani. Classifying Key Risk Factors in Construction Projects. Kyungpook National University, Korea, 2012.

[2] Alberto De Marco and Giulio Mangano. Risk and Value in Privately Financed Health Care Projects. American Society of Civil Engineers, 2013.

[3] Nur Alkaf Abd Karim, Ismail Abd. Rahman Aftab Hameed Memmon and Nurhidayah Jamil. Significant Risk Factors in Construction Projects: Contractor's Perception. Department of Civil Engineering, Universitas Bakrie, Jakarta, Indonesia, 2012.

[4] Jamal F. Al-Bahar and Keith C. Crandall. Systematic Risk Management Approach for Construction Projects. Journal of Construction Engineering and Management, 1990.

[5] Hoàng Trọng và Chu Nguyễn Mộng Ngọc. Phân tích dữ liệu nghiên cứu với SPSS, Tập 1 và 2. NXB. Hồng Đức, Đại học Kinh tế TP.HCM, 2008.

[6] Chính phủ. Nghị định số 59/2015/NĐ-CP ngày 18/06/2015 về quản lý dự án đầu tư xây dựng, 2015.

[7] Lee J. Cronbach. Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests. Psychometrika, vol. 16, pp. 297-334, 1951.

[8] Quốc hội. Luật Xây dựng số 50/2014/QH13 về hoạt động xây dựng, 2014.

[9] Chính phủ. Nghị định số 46/2015/NĐ-CP về quản lý chất lượng và bảo trì công trình xây dựng, 2015.

■Ngày nhận bài: 07/7/ 2026 ■Ngày sửa bài: 13/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 30/7/2026

Đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp cho doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ tại Việt Nam

A Proposal for Low-Cost digital transformation strategies for small and medium construction enterprises in Vietnam

> ĐẶNG VĂN THƯƠNG[1,*], HUỲNH PHÚC TRƯỜNG[2]
[1]Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn
[2]Trường Đại học Văn Hiến
[*]Email: thuong.dangvan@stu.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển đổi số đang trở thành xu hướng tất yếu nhằm nâng cao năng suất, chất lượng và năng lực cạnh tranh của ngành Xây dựng. Doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ (Small and Medium Construction Enterprises - SMCEs) chiếm tỷ trọng lớn trong ngành Xây dựng của Việt Nam nhưng còn gặp nhiều khó khăn trong quá trình chuyển đổi số do hạn chế về nguồn lực tài chính, thiếu nhân lực am hiểu công nghệ, tâm lý ngại thay đổi và sự lúng túng trong việc xây dựng chiến lược chuyển đổi số. Trong khi đó, các mô hình chuyển đổi số hiện nay chủ yếu hướng đến doanh nghiệp xây dựng quy mô lớn hoặc tập trung vào các công nghệ có chi phí đầu tư cao như mô hình thông tin công trình (Building Information Modeling - BIM), hệ thống hoạch định nguồn lực doanh nghiệp (Enterprise Resource Planning - ERP) và bản sao số (Digital Twin), chưa thực sự phù hợp với điều kiện của SMCEs. Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu và phân tích nội dung có định hướng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất chiến lược và lộ trình chuyển đổi số với việc ứng dụng các công nghệ số có chi phí đầu tư thấp và khả năng triển khai linh hoạt cho SMCEs tại Việt Nam.

Từ khóa: Chuyển đổi số; SMEs; SMCEs; BIM; chi phí thấp; DCA.

ABSTRACT

Digital transformation has become an inevitable trend to enhance the productivity, quality, and competitiveness of the construction industry. Small and Medium Construction Enterprises (SMCEs) account for a major proportion of Vietnam's construction sector but still face numerous difficulties in their digital transformation journey due to financial constraints, a shortage of tech-savvy personnel, resistance to change, and confusion in formulating a digital transformation strategy. Meanwhile, current digital transformation models primarily target large-scale construction firms or focus on high-cost technologies such as Building Information Modeling (BIM), Enterprise Resource Planning (ERP), and Digital Twin, rendering them less suitable for the characteristics and resource constraints of SMCEs. This study utilizes a literature review and directed content analysis methods. On this basis, the study proposes a digital transformation strategy and roadmap utilizing low-cost and flexibly deployable digital technologies for SMCEs in Vietnam.

Keywords: Digital transformation; SMEs; SMCEs; BIM; low cost; DCA.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, theo Chỉ thị số 10/CT-TTg ngày 25/3/2025 của Thủ tướng Chính phủ [1], doanh nghiệp vừa và nhỏ (Small and Medium Enterprises - SMEs) chiếm gần 98% tổng số doanh nghiệp đang hoạt động và đóng vai trò quan trọng trong tăng trưởng kinh tế, tạo việc làm và phát triển thị trường. SMEs ở Việt Nam vẫn gặp nhiều khó khăn trong quá trình chuyển đổi số do hạn chế về tài chính, công nghệ, nguồn nhân lực và nhận thức của doanh nghiệp [2]. Trong ngành Xây dựng, nhóm doanh nghiệp này tham gia vào hầu hết các lĩnh vực như thi công xây dựng, xây lắp, hoàn thiện công trình, cung ứng vật liệu, quản lý dự án, tư vấn thiết kế và giám sát. Ngoài những khó khăn chung của SMEs, đặc thù của ngành Xây dựng là tổ chức sản xuất theo dự án, với sự tham gia của nhiều chủ thể độc lập như chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu chính, nhà thầu phụ và nhà cung cấp. Môi trường làm việc phân tán, dữ liệu phân mảnh và quá trình phối hợp phức tạp làm gia tăng yêu cầu về chia sẻ thông tin và quản lý dữ liệu trong quá trình thực hiện dự án.

Trong những năm gần đây, Chính phủ Việt Nam đã ban hành nhiều chủ trương, chính sách quan trọng nhằm thúc đẩy chuyển đổi số quốc gia và chuyển đổi số trong các ngành kinh tế. Quyết định

số 2597/QĐ-TTg ngày 27/11/2025 [3] phê duyệt Đề án chuyển đổi số trong hoạt động xây dựng, quản lý, khai thác kết cấu hạ tầng xây dựng, đặt mục tiêu thúc đẩy chuyển đổi số toàn diện trong ngành xây dựng thông qua xây dựng hệ sinh thái hạ tầng số, chuẩn hóa và chia sẻ dữ liệu, tăng cường ứng dụng Mô hình thông tin công trình (BIM), hệ thống thông tin địa lý (GIS), IoT và AI nhằm đổi mới phương thức quản lý, nâng cao chất lượng công trình và hiệu quả khai thác kết cấu hạ tầng. Đồng thời, Quyết định số 433/QĐ-TTg ngày 16/3/2026 [4] phê duyệt Đề án chuyển đổi số doanh nghiệp nhỏ và vừa giai đoạn 2026 - 2030, hướng tới hỗ trợ doanh nghiệp ứng dụng các nền tảng số, AI và các công nghệ số tiên tiến để nâng cao năng suất, năng lực cạnh tranh và phát triển bền vững. Các chính sách này đã tạo hành lang pháp lý và định hướng chiến lược quan trọng, thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong lĩnh vực đầu tư xây dựng, đồng thời khuyến khích doanh nghiệp xây dựng từng bước triển khai các công nghệ số trong toàn bộ vòng đời công trình, từ khảo sát, thiết kế, thi công đến quản lý vận hành và bảo trì công trình. Mặc dù vậy, việc triển khai chuyển đổi số tại SMCEs vẫn còn gặp nhiều khó khăn do chi phí đầu tư ban đầu lớn, yêu cầu về hạ tầng công nghệ, bản quyền phần mềm, đào tạo nhân lực và thay đổi quy trình quản lý.

Xuất phát từ thực tiễn trên, bài báo đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp dành cho SMCEs tại Việt Nam. Chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp là cách tiếp cận triển khai chuyển đổi số theo lộ trình ưu tiên, lựa chọn các quy trình có giá trị cao và các nhóm giải pháp công nghệ có tổng chi phí sở hữu thấp, nhằm tối ưu hóa hiệu quả đầu tư và giảm rủi ro triển khai đối với SMCEs. Thay vì ưu tiên đầu tư ngay các hệ thống công nghệ có chi phí lớn, mô hình hướng đến việc khai thác các giải pháp số có chi phí hợp lý, triển khai theo từng giai đoạn và tích lũy năng lực số của doanh nghiệp. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng góp phần bổ sung cơ sở lý luận về chuyển đổi số trong SMCEs, đồng thời cung cấp một khung tham chiếu cho doanh nghiệp và các nghiên cứu tiếp theo trong việc xây dựng lộ trình chuyển đổi số phù hợp cho SMCEs với bối cảnh Việt Nam.

2. THỰC TRẠNG VÀ ĐẶC THÙ CỦA SMCES TẠI VIỆT NAM

SMCEs đóng vai trò quan trọng trong chuỗi giá trị của ngành Xây dựng Việt Nam. Nghị định số 80/2021/NĐ-CP ngày 26/8/2021 [5] của Chính phủ quy định tiêu chí xác định doanh nghiệp xây dựng nhỏ là doanh nghiệp có số lao động tham gia bảo hiểm xã hội (BHXH) bình quân năm không quá 100 người; tổng doanh thu năm không quá 50 tỷ đồng hoặc tổng nguồn vốn không quá 20 tỷ đồng. Đối với doanh nghiệp vừa, có số lao động tham gia BHXH bình quân năm không quá 200 người; tổng doanh thu năm không quá 200 tỷ đồng hoặc tổng nguồn vốn không quá 100 tỷ đồng. Nhóm doanh nghiệp này tham gia vào hầu hết các lĩnh vực như quản lý dự án, tư vấn đấu thầu, tư vấn thiết kế, thi công xây dựng, xây lắp, hoàn thiện công trình, giám sát, cung ứng vật liệu và dịch vụ kỹ thuật. Với đặc điểm quy mô vốn, lao động và năng lực quản trị còn hạn chế, SMCEs vừa tạo ra sự linh hoạt cho thị trường xây dựng, vừa đối mặt với nhiều thách thức trong quá trình đổi mới công nghệ và chuyển đổi số.

2.1. Thực trạng của SMCEs tại Việt Nam

Đặc điểm nổi bật của các SMCEs là quy mô vốn và năng lực tài chính còn hạn chế. Nguồn lực đầu tư chủ yếu tập trung cho hoạt động thi công, máy móc, thiết bị, vật tư công trình và vốn lưu động phục vụ dự án, trong khi ngân sách dành cho đầu tư công nghệ thông tin và chuyển đổi số còn khiêm tốn. Điều này làm cho doanh nghiệp khó có thể tiếp cận và triển khai đồng thời các hệ thống có chi phí đầu tư ban đầu lớn như BIM quy mô doanh nghiệp, ERP tích hợp hoặc Digital Twin, đây cũng là khó khăn chung của các SMCEs trên thế giới [6], [7].

Về mặt tổ chức, các SMCEs sở hữu lợi thế lớn về cơ cấu nhân sự đơn giản và các cấp quản lý trung gian được tối giản hóa, tạo điều kiện cho cơ chế ra quyết định diễn ra linh hoạt và kịp thời. Tuy nhiên, việc thiếu các quy trình quản trị chuẩn hóa, thiếu hệ thống quản trị dữ liệu và phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm của lãnh đạo làm giảm hiệu quả khi mở rộng quy mô hoặc triển khai chuyển đổi số.

Trong những năm gần đây, nhiều doanh nghiệp xây dựng đã bắt đầu ứng dụng các phần mềm quản lý dự án, kế toán, quản lý văn bản điện tử và BIM. Tuy nhiên, mức độ ứng dụng còn không đồng đều giữa các doanh nghiệp và chủ yếu tập trung ở các doanh nghiệp lớn. SMCEs thường chỉ triển khai một số phần mềm độc lập phục vụ từng chức năng như kế toán, dự toán hoặc quản lý tiến độ công trường, trong khi dữ liệu giữa các hệ thống chưa được kết nối.

Nguồn nhân lực là một trong những yếu tố quyết định thành công của chuyển đổi số. Các nghiên cứu về SMCEs cho thấy năng lực số của người lao động, năng lực quản trị và khả năng học hỏi của tổ chức là những yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình chuyển đổi số [8].

Tuy nhiên, SMCEs thường thiếu đội ngũ chuyên trách về công nghệ thông tin hoặc chuyển đổi số. Kỹ sư và cán bộ quản lý chủ yếu tập trung vào chuyên môn xây dựng, trong khi kỹ năng sử dụng dữ liệu, phân tích thông tin và khai thác các nền tảng số còn hạn chế.

Ở nhiều doanh nghiệp, việc ứng dụng công nghệ chủ yếu xuất phát từ nhu cầu giải quyết các vấn đề trước mắt, chẳng hạn như phần mềm kế toán, số hóa hồ sơ dạng cơ bản hoặc trao đổi thông tin nội bộ bằng mạng xã hội giữa văn phòng và công trường. Do thiếu chiến lược tổng thể, các giải pháp được triển khai riêng lẻ và thiếu sự kết nối giữa các bộ phận, thiếu quy trình kiểm soát.

Trong khi đó, chuyển đổi số cần được tiếp cận như một quá trình thay đổi đồng bộ về tư duy chiến lược của lãnh đạo, mô hình tổ chức quản trị, quy trình vận hành, năng lực số của người lao động và hạ tầng công nghệ, thay vì chỉ là đầu tư phần mềm hoặc thiết bị. Đây là khoảng cách lớn giữa thực trạng triển khai tại SMCEs và các mô hình chuyển đổi số toàn diện đã được đề xuất và triển khai cho các doanh nghiệp xây dựng đầu ngành, là rào cản cho sự bứt phá của SMCEs trong kỷ nguyên mới.

2.2. Đặc thù quản lý theo dự án của doanh nghiệp xây dựng

Khác với doanh nghiệp sản xuất, doanh nghiệp xây dựng tổ chức hoạt động theo từng dự án. Mỗi dự án có thời gian thực hiện, vị trí địa lý, điều kiện địa chất, kỹ thuật thi công và thành phần tham gia khác nhau. Trong một dự án xây dựng thường có sự tham gia của chủ đầu tư, quản lý dự án, tư vấn thiết kế/giám sát, nhà thầu chính, nhà thầu phụ, nhà cung cấp vật liệu và các đơn vị kiểm định.

Mô hình tổ chức này làm cho thông tin được tạo ra và lưu trữ tại nhiều đơn vị khác nhau, gây khó khăn cho việc chia sẻ dữ liệu, phối hợp công việc và kiểm soát tiến độ. Đây cũng là nguyên nhân khiến ngành xây dựng được xem là một trong những ngành có mức độ phân mảnh cao và là rào cản đối với quá trình chuyển đổi số tổng thể của ngành.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài báo sử dụng phương pháp nghiên cứu tổng quan tài liệu (literature review) và phương pháp phân tích nội dung có định hướng (directed content analysis - DCA) nhằm đề xuất mô hình chuyển đổi số chi phí thấp dành cho SMCEs tại Việt Nam.

Tổng quan tài liệu là quá trình phân tích, tổng hợp và tích hợp các kết quả nghiên cứu trước nhằm xây dựng nền tảng lý thuyết, xác định khoảng trống nghiên cứu và tạo cơ sở cho việc phát triển các mô hình hoặc lý thuyết mới [9]. Phương pháp nghiên cứu tổng quan tài liệu được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu phát triển khung lý thuyết và mô hình khái niệm giúp tổng hợp tri thức hiện có, xác định khoảng trống nghiên cứu và xây dựng nền tảng lý thuyết cho mô hình đề xuất [10]. Để có góc nhìn tổng quan về bối cảnh và kết quả chuyển đổi số của các doanh nghiệp nhóm tác giả đã nghiên

cứu các tài liệu khái quát về chuyển đổi số cho SMEs và SMCEs hiện nay. Trên thế giới, chuyển đổi số trong ngành xây dựng đã đạt được nhiều thành tựu quan trọng thông qua việc tích hợp BIM, Digital Twin, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) và Internet vạn vật (Internet of Things - IoT), cho phép giám sát công trình theo thời gian thực, dự báo bảo trì và tối ưu hóa quá trình quản lý, vận hành công trình. Sự hội tụ giữa BIM, Digital Twin, AI, IoT và điện toán đám mây sẽ là nền tảng của quá trình chuyển đổi số trong ngành Xây dựng, góp phần nâng cao khả năng tích hợp dữ liệu, hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực và quản lý toàn bộ vòng đời công trình [11]. Quá trình chuyển đổi số của SMEs là quá trình nâng cao dần mức độ trưởng thành số, trong đó các rào cản về nguồn lực tài chính, kỹ năng số và năng lực quản trị vẫn là những yếu tố hạn chế tốc độ chuyển đổi so với doanh nghiệp lớn [12]. Chuyển đổi số giúp SMCEs nâng cao năng suất, tăng khả năng giám sát công trường, cải thiện an toàn lao động và hỗ trợ quản lý toàn bộ vòng đời dự án; tuy nhiên ngành xây dựng nói chung vẫn đang trong giai đoạn đầu của chuyển đổi số [6].

Sau khi tổng hợp và lựa chọn tài liệu phù hợp với nội dung nghiên cứu, các tài liệu được phân tích theo phương pháp DCA. Phân tích nội dung không phải là một phương pháp duy nhất, mà tồn tại ba cách tiếp cận khác nhau, tùy thuộc vào mục tiêu nghiên cứu [13]. Nghiên cứu này kế thừa các lý thuyết và mô hình chuyển đổi số hiện có, đồng thời tổng hợp các kết quả nghiên cứu trước để đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp dành cho SMCEs tại Việt Nam. Trong nghiên cứu này, quá trình phân tích kế thừa khung chuyển đổi số cho SMEs của OECD [12], khung hội tụ công nghệ số trong xây dựng (BIM-Digital Twin-IoT-AI) [11], khung chuyển đổi số ngành Xây dựng [6], [14]; khung các yếu tố thúc đẩy chuyển đổi số [8], và mô hình văn hóa tổ chức [15]. Nghiên cứu xây dựng một lộ trình gồm năm giai đoạn, từ chuẩn bị tổ chức, lập kế hoạch triển khai, quản lý quá trình chuyển đổi đến duy trì và cải tiến liên tục đã được trình bày trong [7]. Trên cơ sở đó, các kết quả nghiên cứu trước được phân loại và tổng hợp nhằm xác định các nguyên tắc, quy trình, giải pháp, từ đó đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp phù hợp với SMCEs tại Việt Nam.

4. NGUYÊN TẮC VÀ QUY TRÌNH CHUYỂN ĐỔI SỐ

4.1. Nguyên tắc của chiến lược chuyển đổi số

Trên cơ sở phân tích đặc thù của SMCEs, nghiên cứu đề xuất chiến lược chuyển đổi số chi phí thấp dựa trên ba nguyên tắc:

- Ưu tiên số hóa quy trình trước khi đầu tư công nghệ phức tạp,
- Sử dụng các giải pháp có tổng chi phí sở hữu thấp (ví dụ mô hình phần mềm như một dịch vụ (Software as a Service - SaaS), mô hình điện toán đám mây thông qua Internet - Cloud Computing) và có khả năng mở rộng,
- Triển khai theo từng giai đoạn, phù hợp với mức độ sẵn sàng của doanh nghiệp.

Chiến lược này hướng đến mục tiêu giúp doanh nghiệp đạt được hiệu quả quản trị thông qua việc cải tiến quy trình và khai thác dữ liệu, thay vì tập trung đầu tư đồng thời vào nhiều hệ thống công nghệ.

4.2. Quy trình thực hiện chuyển đổi số

Kế thừa các lý thuyết và mô hình chuyển đổi số đã được công bố, nghiên cứu này đề xuất một quy trình triển khai chuyển đổi số chi phí thấp phù hợp với đặc điểm của SMCEs. Quy trình triển khai cho SMCEs tại Việt Nam được đề xuất chia làm 7 giai đoạn như Hình 1.

Hình 1. Quy trình triển khai chuyển đổi số cho SMCEs

Trình tự thực hiện với nội dung chi tiết được mô tả ở Bảng 1.

Bảng 1. Nội dung thực hiện và kết quả của quy trình chuyển đổi số chi phí thấp cho SMCEs

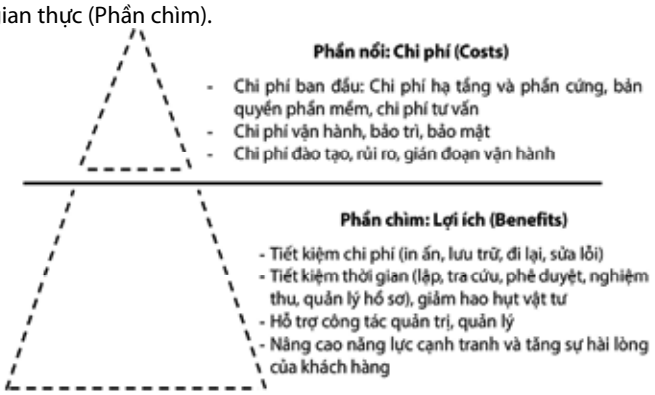
Bước	Nội dung thực hiện	Kết quả
Tham quan, tập huấn chuyển đổi số cho lãnh đạo, nhân sự phụ trách	Tổ chức cho lãnh đạo, nhân viên phụ trách tham quan các mô hình chuyển đổi số ở các cơ quan, doanh nghiệp có mô hình chuyển đổi số hiệu quả. Cử nhân sự tham gia tập huấn, đào tạo chuyển đổi số	Xây dựng đề án chuyển đổi số cho doanh nghiệp
Đánh giá thực trạng của doanh nghiệp	Khảo sát hiện trạng (hạ tầng, quy trình, dữ liệu, nhân lực, phần mềm) và mức độ sẵn sàng chuyển đổi số. Rà soát, hoàn thiện quy trình tác nghiệp	Báo cáo đánh giá hiện trạng, xác định mức độ trưởng thành số và lập danh mục ưu tiên chuyển đổi số
Xác định thứ tự ưu tiên thực hiện	Đánh giá tính cấp thiết, hiệu quả, khả năng triển khai của từng quy trình và lựa chọn lĩnh vực ưu tiên chuyển đổi số	Xác định danh mục ưu tiên và xây dựng lộ trình triển khai chuyển đổi số theo giai đoạn
Phân tích, so sánh và lựa chọn giải pháp công nghệ phù hợp	Đánh giá, so sánh các giải pháp công nghệ theo tiêu chí kỹ thuật, chi phí và ưu tiên mô hình Cloud/SaaS hoặc mã nguồn mở chi phí thấp	Phê duyệt danh mục giải pháp công nghệ, lập kế hoạch triển khai và dự toán kinh phí đầu tư
Lựa chọn đơn vị hoặc bộ phận triển khai thí điểm	Triển khai thử nghiệm theo phạm vi lựa chọn (phòng ban/dự án/quy trình), kết hợp đào tạo người dùng, lập nhóm hỗ trợ kỹ thuật và giám sát vận hành	Triển khai mô hình thí điểm, tổng kết bài học kinh nghiệm và các vấn đề phát sinh để chuẩn bị nhân rộng
Đánh giá hiệu quả chuyển đổi số	Đánh giá kết quả triển khai qua các chỉ số: tỷ lệ số hóa, thời gian xử lý, chi phí vận hành, năng suất, độ hài lòng và khả năng chia sẻ dữ liệu	Báo cáo đánh giá hiệu quả, xác định rõ lợi ích đạt được, hạn chế tồn tại và các nội dung cần điều chỉnh
Chuẩn hóa và triển khai trong toàn doanh nghiệp	Chuẩn hóa quy trình, dữ liệu và tài liệu hướng dẫn; tổ chức đào tạo, mở rộng triển khai toàn diện và duy trì cải tiến liên tục	Triển khai đồng bộ hệ thống chuyển đổi số và chuẩn hóa quy trình toàn doanh nghiệp

5. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP CÔNG NGHỆ CHUYỂN ĐỔI SỐ CHI PHÍ THẤP

5.1. Phân tích chi phí, lợi ích và hiệu quả đầu tư chuyển đổi số

Phân tích chi phí đầu tư, lợi ích đạt được và hiệu quả tổng thể là cơ sở quan trọng để doanh nghiệp quyết định đầu tư chuyển đổi số phù hợp với quy mô và nguồn lực của mình. Đây cũng là nền tảng giúp đánh giá tính khả thi và hiệu quả kinh tế của các chương trình chuyển đổi số trong SMCEs. Sự tương phản giữa chi phí và lợi ích của quá trình chuyển đổi số được nhóm tác giả khái quát hóa dựa trên mô hình tảng băng chìm (Hình 2) [15].

Đối với SMCEs, chuyển đổi số đòi hỏi doanh nghiệp phải đầu tư vào hạ tầng công nghệ, phần mềm, đào tạo nhân lực và duy trì hệ thống, tạo ra áp lực chi phí đáng kể trong giai đoạn đầu triển khai (Phần nổi). Tuy nhiên, các khoản đầu tư này mang lại nhiều lợi ích như giảm chi phí vận hành, tiết kiệm thời gian xử lý công việc, nâng cao năng suất lao động và giảm sai sót trong công việc. Chuyển đổi số còn giúp SMCEs tăng cường khả năng kiểm soát tiến độ, chi phí và chất lượng công trình thông qua việc quản lý dữ liệu theo thời gian thực (Phần chìm).



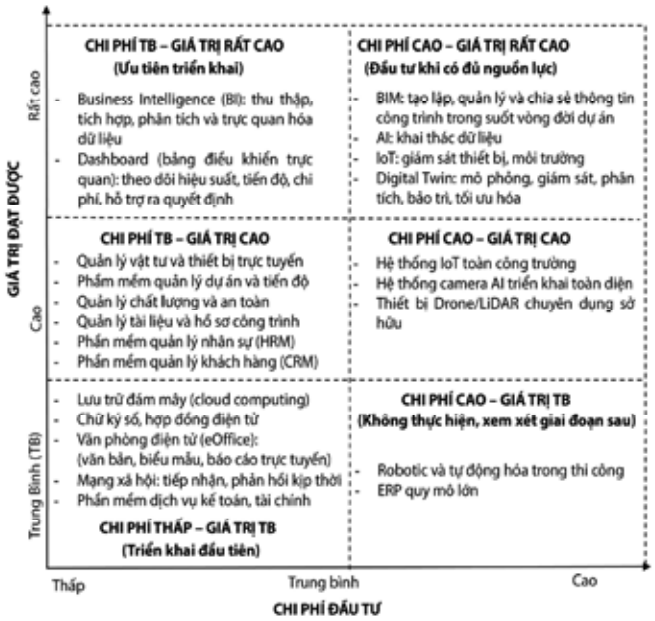
Hình 2. Mối quan hệ giữa chi phí đầu tư và lợi ích của chuyển đổi số

Khi được triển khai phù hợp với quy mô và nguồn lực của doanh nghiệp, lợi ích tích lũy sẽ vượt qua chi phí đầu tư ban đầu, góp phần nâng cao hiệu quả hoạt động và năng lực cạnh tranh. Hiệu quả mà chuyển đổi số mang lại bao gồm ba nhóm: hiệu quả kinh tế, hiệu quả vận hành và hiệu quả chiến lược. Chuyển đổi số không chỉ tạo ra lợi ích trong ngắn hạn mà còn nâng cao năng lực cạnh tranh và khả năng phát triển bền vững của doanh nghiệp. Hệ thống dữ liệu minh bạch, quy trình quản trị được chuẩn hóa và năng lực quản lý dự án được cải thiện giúp SMCEs đáp ứng tốt hơn các yêu cầu của chủ đầu tư, nâng cao khả năng tham gia và trúng thầu các dự án quy mô lớn. Về lâu dài, hiệu quả của chuyển đổi số được thể hiện ở sự chuyển đổi toàn diện từ mô hình quản lý truyền thống sang mô hình quản trị dựa trên dữ liệu, tạo nền tảng cho mở rộng quy mô hoạt động và tăng khả năng thích ứng trong điều kiện biến động liên tục về chi phí nguyên vật liệu, nhân công của ngành xây dựng.

5.2. Lựa chọn công nghệ chuyển đổi số phù hợp

Nhằm hỗ trợ SMCEs lựa chọn các giải pháp công nghệ phù hợp với điều kiện thực tế, nghiên cứu đề xuất ma trận lựa chọn công nghệ chuyển đổi số dựa trên ba tiêu chí đánh giá gồm: chi phí đầu tư, giá trị đạt được, mức độ ưu tiên triển khai (Hình 3). Trong đó, chi phí đầu tư phản ánh tổng nguồn lực tài chính cần thiết để triển khai công nghệ, bao gồm chi phí phần mềm, phần cứng, đào tạo, vận hành và bảo trì. Giá trị đạt được thể hiện mức độ đóng góp của công nghệ trong việc nâng cao năng suất lao động, chất lượng công trình, hiệu quả quản lý, giảm chi phí và tăng khả năng phối hợp giữa các bên tham gia dự án. Mức độ ưu tiên triển khai được xác định theo lộ trình chuyển đổi số chi phí thấp, từ giải pháp nền tảng dễ triển khai đến các công nghệ chuyên sâu đòi hỏi mức độ trưởng thành số cao hơn.

Trên cơ sở ba tiêu chí này, các nhóm công nghệ được phân loại và bố trí trên ma trận nhằm giúp SMCEs xác định công nghệ nào cần ưu tiên đầu tư. Các giải pháp chi phí thấp - giá trị trung bình cần được triển khai đầu tiên trong giai đoạn từ 0 - 12 tháng. Giai đoạn thứ 2 từ 1 - 3 năm dành cho các giải pháp chi phí trung bình và giá trị đạt được từ cao đến rất cao. Giai đoạn từ sau 3 năm trở đi khi có đủ nguồn lực sẽ lựa chọn giải pháp chi phí cao giá trị rất cao áp dụng trước, cho đến chi phí cao - giá trị cao.



Hình 3. Ma trận lựa chọn giải pháp công nghệ cho SMCEs

Ngoài ba tiêu chí trên, khi xem xét ứng dụng, doanh nghiệp cần lưu ý mức độ phù hợp với loại hình doanh nghiệp xây dựng của mình để nâng cao tính thực tiễn và khả năng áp dụng trong quá trình xây dựng lộ trình chuyển đổi số cho các SMCEs tại Việt Nam.

5.3. Tối ưu chi phí chuyển đổi số tận dụng chính sách của Chính phủ

SMCEs cần tận dụng chính sách của nhà nước về thúc đẩy phát triển chuyển đổi số theo Quyết định số 2597/QĐ-TTg ngày 27/11/2025 [3] và Quyết định số 433/QĐ-TTg ngày 16/3/2026 [4] để tối ưu chi phí, rút ngắn quá trình chuyển đổi để nâng cao năng suất lao động, tiếp cận các công nghệ mới hướng tới nâng cao năng lực cạnh tranh và phát triển bền vững.

Tận dụng hạ tầng số và nền tảng số dùng chung: Khai thác các nền tảng số, sinh thái số do nhà nước phát triển.

Tận dụng các chương trình đào tạo, hỗ trợ đổi mới sáng tạo: Tham gia các chương trình đào tạo, tập huấn kỹ năng số miễn phí hoặc chi phí thấp do Bộ Khoa học và Công nghệ, các địa phương, trường đại học, hiệp hội tổ chức. Tham gia các chương trình hỗ trợ đổi mới sáng tạo, hỗ trợ ứng dụng công nghệ mới, phát triển công nghệ, kết nối quỹ hỗ trợ và các chuyên gia.

Kết nối với mạng lưới hỗ trợ của cơ quan Nhà nước thông qua Sở Khoa học và Công nghệ, các trường đại học, hiệp hội để được đánh giá, hỗ trợ, tư vấn lộ trình chuyển đổi số cho phù hợp.

Tận dụng dữ liệu dùng chung của ngành xây dựng để chuẩn hóa dữ liệu, mã hóa danh mục, kết nối và chia sẻ hệ sinh thái dữ liệu của ngành xây dựng, tránh đầu tư trùng lặp, phân tán, giảm chi phí thu thập, quản lý dữ liệu.

6. KẾT LUẬN

Để công tác chuyển đổi số thực sự mang lại hiệu quả, SMCEs cần theo dõi, đánh giá hiệu quả, cập nhật quy trình công nghệ hàng năm, tiến tới xây dựng văn hóa cải tiến liên tục, nâng cao hiệu suất tạo ra giá trị, năng lực số bền vững cho doanh nghiệp. Lãnh đạo SMCEs cần xác định chuyển đổi số là một chiến lược phát triển dài hạn, tiên phong trong việc học tập, trang bị kiến thức chuyển đổi số, trực tiếp tham gia chỉ đạo, theo dõi quá trình thực hiện, phân bổ nguồn lực. Sự cam kết, tầm nhìn của lãnh đạo SMCEs là yếu tố quyết định đến thành công của quá trình chuyển đổi số.

Nhà nước cần quyết liệt đầu tư và triển khai các đề án chuyển đổi số đã ban hành, tạo ra các mô hình điểm và hạ tầng dùng chung. Điều này đặc biệt có ý nghĩa với các doanh nghiệp xây dựng, với đặc thù tổ chức hoạt động theo dự án và có tính phân mảnh cao.

Song song với đó, cần thiết lập một lộ trình quản lý rõ ràng, chuyển dần từ các biện pháp khuyến khích ban đầu sang các quy định bắt buộc mang tính pháp lý nhằm chuẩn hóa năng lực ứng dụng chuyển đổi số. Cơ quan quản lý hướng tới lồng ghép mức độ chuyển đổi số của doanh nghiệp vào quy chế đấu thầu dự án công (tiêu chí kỹ thuật hoặc năng lực). Việc cộng điểm thưởng trong hồ sơ dự thầu cho các SMCEs sẽ tạo ra động lực chuyển đổi số mạnh mẽ. Năng lực này cần được lượng hóa dựa trên hai chỉ số: chất lượng nguồn nhân lực (cá nhân, tập thể có chứng nhận hoàn thành các khóa tập huấn, đào tạo số chuẩn hóa) và mức độ trưởng thành số của tổ chức (doanh nghiệp sở hữu hệ thống ứng dụng chuyển đổi số) theo bộ khung tiêu chuẩn, cấp độ trưởng thành số do cơ quan nhà nước ban hành.

Thông qua phương pháp tổng quan tài liệu và phân tích nội dung có định hướng, nghiên cứu này đã làm rõ các xu hướng chuyển đổi số của ngành Xây dựng toàn cầu, đồng thời chỉ ra những rào cản thực tế SMCEs tại Việt Nam đang đối mặt. Từ đó, nhóm tác giả đề xuất một lộ trình chuyển đổi số gồm bảy giai đoạn. Nhóm tác giả đã phân tích chi phí, lợi ích, hiệu quả đầu tư để hỗ trợ SMCEs ra quyết định đầu tư cũng như xây dựng ma trận lựa chọn công nghệ chuyển đổi số phù hợp điều kiện của SMCEs. Ma trận này phân tích các giải pháp dựa trên chi phí, giá trị cốt lõi, độ tương thích và mức độ ưu tiên, trở thành công cụ hỗ trợ ra quyết định hiệu quả cho doanh nghiệp. Tuy nhiên, do phạm vi nghiên cứu tập trung vào việc phát triển lộ trình, công cụ hỗ trợ ra quyết định và lựa chọn giải pháp công nghệ ở cấp độ lý thuyết, hiệu quả triển khai trong các bối cảnh doanh nghiệp cụ thể chưa được kiểm chứng thực tế. Vì vậy, các nghiên cứu tiếp theo cần đánh giá tính phù hợp, hiệu quả và khả năng ứng dụng của chiến lược chuyển đổi số trong các doanh nghiệp xây dựng tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thủ tướng Chính phủ. Chỉ thị số 10/CT-TTg về thúc đẩy phát triển doanh nghiệp nhỏ và vừa, 2025.

[2] L. N. T. Đồng. Chuyển đổi số trong doanh nghiệp nhỏ và vừa - Thách thức và giải pháp. Tạp chí Kinh tế - Tài chính, 2025. Internet: https://nghiencuu.tapchikinhtetaichinh.vn/chuyen-doi-so-trong-doanh-nghiep-nho-va-vua-thach-thuc-va-giai-phap-75372.html (truy cập: tháng 8/2026).

[3] Thủ tướng Chính phủ. Đề án chuyển đổi số trong hoạt động xây dựng, quản lý, khai thác kết cấu hạ tầng xây dựng, 2025.

[4] Thủ tướng Chính phủ. Đề án chuyển đổi số các doanh nghiệp nhỏ và vừa giai đoạn 2026 - 2030, 2026.

[5] Thủ tướng Chính phủ. Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật Hỗ trợ doanh nghiệp nhỏ và vừa, 2021.

[6] A. H. Naji, K. K., Gunduz, M., Alhenzab, F. H., Al-Hababi, H., & Al-Qahtani. A Systematic Review of the Digital Transformation of the Building Construction Industry. IEEE Access, vol. 12, no. 1, pp. 31461-31487, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365934.

[7] Z. David et al. Change Management of Organizational Digital Transformation: A Proposed Roadmap for Building Information Modelling-Enabled Facilities Management. Buildings, 2024.

[8] L. S. and S. X. Duan. Towards Understanding Enablers of Digital Transformation in Small and Medium-Sized Enterprises, in Australasian Conference on Information Systems, pp. 1-7, 2021.

[9] W. J. and R. T. Watson. Analysing the past to prepare for the future - Writing A Literature Review. MIS Q., vol. 26, no. 2, 2002.

[10] H. Snyder. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Bus. Res., vol. 104, no. August, pp. 333-339, 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

[11] S. M. E. Sepasgozar et al. BIM and Digital Twin for Developing Convergence Technologies as Future of Digital Construction. Buildings, 2023.

[12] Organisation for Economic Co-operation and Development. The Digital Transformation of SMEs. OECD Publishing, 2021.

[13] Hsiu-Fang Hsieh and Sarah E. Shannon. Three Approaches to Qualitative Content Analysis. Qual. Health Res., 2005, doi: 10.1177/1049732305276687.

[14] A. O. Olanipekun and M. Sutrisna. Facilitating Digital Transformation in Construction - A Systematic Review of the Current State of the Art. Front. Built Environ., vol. 7, no. 7, pp. 1-21, 2021, doi: 10.3389/fbuil.2021.660758.

[15] H. Edgar. Organizational Culture and Leadership. John Wiley & Sons, 2010.

■ Ngày nộp bài: 04/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 10/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/9/2026

Xu hướng điện hóa giao thông công cộng và hàm ý chính sách cho Việt Nam: Trường hợp xe buýt và taxi

Electrification trends in public transport and policy implications for Vietnam: The case of buses and taxis

> THS TRẦN THỊ KIM THANH[1], TS THẠCH MINH QUÂN[2,*], PGS.TS NGUYỄN HỒNG THÁI[2]
[1]Học viện Chiến lược, bồi dưỡng cán bộ xây dựng
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: thachquan@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích xu hướng điện hóa xe buýt và taxi trên thế giới dựa trên các báo cáo của IEA, World Bank, đồng thời căn cứ đánh giá thực trạng triển khai tại Việt Nam, cho thấy quá trình chuyển đổi vẫn còn thiếu đồng bộ về hạ tầng, tài chính và thể chế. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất một số hàm ý chính sách nhằm thúc đẩy điện hóa giao thông công cộng (GTCC) theo hướng hệ thống, đồng bộ và phù hợp với điều kiện thực tiễn Việt Nam.

Từ khóa: Xe buýt điện; taxi điện; chính sách công.

ABSTRACT

This paper analyses global electrification trends in buses and taxis, drawing on reports from the IEA and the World Bank and assesses the current state of implementation in Vietnam. The findings indicate that the transition process remains fragmented, with insufficient coordination in infrastructure, financing and institutional frameworks. On this basis, the paper proposes a set of policy implications to advance the electrification of public transport in a systematic, coordinated manner that is aligned with Vietnam's specific contextual conditions.

Keywords: Electric buses; electric taxis; public policy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, điện hóa phương tiện GTCC đang từng bước trở thành một xu hướng rõ nét trong quá trình chuyển đổi xanh trong ngành Giao thông vận tải. Về mặt định hướng chính sách, Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 đã xác lập lộ trình chuyển đổi năng lượng xanh cho toàn ngành, trong đó quy định từ năm 2025, 100% xe buýt thay thế, đầu tư mới phải sử dụng điện hoặc năng lượng xanh; đối với taxi, từ năm 2030 các phương tiện đầu tư mới phải chuyển sang sử dụng điện, năng lượng xanh. Đây là cơ sở quan trọng cho thấy điện hóa xe buýt và taxi đã được đặt thành định hướng chính thức ở cấp quốc gia.

Bài báo nhằm: (i) Phân tích xu hướng điện hóa xe buýt và taxi trên thế giới, (ii) đánh giá thực trạng tại Việt Nam và (iii) đề xuất hàm ý chính sách phù hợp.

2. XU HƯỚNG ĐIỆN HÓA GTCC TRÊN THẾ GIỚI

Kết quả tổng hợp và phân tích các tài liệu quốc tế cho thấy điện hóa phương tiện GTCC đã chuyển từ giai đoạn thử nghiệm sang giai đoạn triển khai mở rộng trên phạm vi toàn cầu. Theo IEA[1], điện hóa phương tiện GTCC đang chuyển từ giai đoạn thí điểm sang giai đoạn mở rộng quy mô, trong đó xe buýt đô thị là phân khúc đi đầu, còn taxi tại khu vực đô thị đang tăng nhanh ở những thị trường có cường độ khai thác lớn và hạ tầng sạc phát triển. IEA đánh giá thị trường xe buýt điện toàn cầu tiếp tục mở rộng trong năm 2024, với doanh số vượt 70.000 xe, tăng khoảng 30% so với năm trước; đồng thời, hạ tầng sạc cũng tăng rất nhanh khi thế giới bổ sung hơn 1,3 triệu điểm sạc công cộng chỉ trong năm 2024, tăng hơn 30% so với năm 2023. Diễn biến này cho thấy điện hóa GTCC không còn là xu hướng cục bộ, mà đã trở thành một cấu phần quan trọng của quá trình chuyển đổi năng lượng và giảm phát thải trong giao thông đô thị.

Về động lực thúc đẩy, gồm 4 nhóm yếu tố chính. Thứ nhất, áp lực cải thiện chất lượng môi trường không khí tại các đô thị lớn, nơi phát thải từ giao thông là một trong những nguồn gây ô nhiễm chủ yếu. Thứ hai, các cam kết quốc tế về giảm phát thải khí nhà kính buộc các quốc gia phải chuyển đổi sang các giải pháp giao thông ít phát thải hơn. Thứ ba, yếu tố kinh tế vận hành ngày càng trở nên thuận lợi đối với phương tiện điện, đặc biệt trong các mô hình khai thác cường độ cao. Thứ tư, yêu cầu hiện đại hóa hệ thống vận tải công cộng, phương tiện điện thường gắn với các giải pháp số hóa, quản lý thông minh và chất lượng dịch vụ.

Hiện nay, tiếp cận theo phát triển theo mô hình hệ sinh thái, bao gồm sự tích hợp đồng bộ giữa phương tiện, hạ tầng sạc, nguồn

[1] *Global EV Outlook 2025*

cung năng lượng, mô hình tài chính và cơ chế quản trị vận hành. Điều này cho thấy điện hóa GTCC không chỉ là vấn đề công nghệ mà còn là một bài toán tổng thể về tổ chức hệ thống và thể chế.

Bên cạnh đó, quá trình điện hóa GTCC trên thế giới diễn ra không đồng đều giữa các khu vực và loại hình phương tiện. Sự khác biệt này phản ánh vai trò quan trọng của năng lực thể chế, khả năng tài chính và mức độ phát triển hạ tầng quyết định tốc độ chuyển đổi.

2.1. Xu hướng điện hóa xe buýt công cộng

Trong các loại hình GTCC, xe buýt điện hiện là phân khúc phát triển nhanh nhất và có nhiều kinh nghiệm triển khai nhất trên thế giới. Theo IEA, doanh số xe buýt điện toàn cầu năm 2024 đạt hơn 70.000 xe, tăng khoảng 30% so với năm 2023; riêng ngoài Trung Quốc, doanh số năm 2024 tăng không mạnh bằng nhưng đã gần gấp ba lần so với năm 2020. Cũng theo IEA, ở châu Âu, doanh số xe buýt điện tăng gần 15% trong năm 2024, nâng thị phần lên hơn 13% đối với toàn bộ phân khúc xe buýt; còn nếu chỉ xét xe buýt đô thị thì gần một nửa số xe buýt đô thị mới bán ra trong năm 2024 tại châu Âu là xe pin điện. Các tài liệu chuyên ngành của UITP cũng cho thấy châu Âu đã đi khá xa trong phân khúc này. UITP[2] nêu rằng đến năm 2025, châu Âu ước đã có khoảng 35.000 xe buýt điện hoạt động; riêng trong năm 2024, cứ ba xe buýt đô thị mới đăng ký tại EU thì có một xe là xe buýt pin điện. Đây là chỉ dấu quan trọng vì nó phản ánh quá trình điện hóa không còn chỉ diễn ra ở các đô thị tiên phong, mà đã bước vào giai đoạn phổ cập dần trong mua sắm công và tái cơ cấu đội xe buýt đô thị tại châu Âu. Về công nghệ, một điểm nổi bật là thị trường xe buýt điện hiện gần như đã nghiêng hẳn sang xe buýt pin điện. IEA cho biết tỷ trọng xe buýt plug-in hybrid trong tổng doanh số xe buýt điện đã giảm rất mạnh: ở Trung Quốc, từ mức khoảng 60% năm 2014 xuống gần 0% năm 2024; ở phần còn lại của thế giới, từ khoảng 60% năm 2015 xuống khoảng 1% năm 2024. Điều này cho thấy công nghệ pin, giá pin giảm, đa dạng mẫu xe và cải thiện công nghệ sạc đã làm cho mô hình xe buýt pin điện trở nên phổ biến trong khai thác đô thị.

Như vậy, khẳng định xe buýt điện là phân khúc có tính khả thi cao nhất trong điện hóa GTCC, nhưng là phân khúc đòi hỏi mức độ can thiệp chính sách và năng lực quản trị cao nhất.

2.2. Xu hướng điện hóa taxi

Khác với xe buýt, điện hóa taxi diễn ra theo một logic hoàn toàn khác (chủ yếu quyết định bởi yếu tố kinh tế vi mô và điều kiện hạ tầng), mang tính thị trường rõ nét hơn và ít phụ thuộc vào cơ chế quản lý trực tiếp của Nhà nước.

Trước hết, tổng chi phí sở hữu (Total Cost of Ownership - TCO) là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến quyết định chuyển đổi của doanh nghiệp và lái xe. Khi chi phí vận hành của xe điện thấp hơn đáng kể so với xe sử dụng nhiên liệu hóa thạch, đặc biệt trong điều kiện giá nhiên liệu tăng, taxi điện trở nên hấp dẫn về mặt kinh tế.

Thứ hai, hạ tầng sạc, đặc biệt là sạc nhanh công cộng, đóng vai trò quyết định đối với khả năng vận hành của taxi điện. Do đặc thù hoạt động với cường độ cao và yêu cầu quay vòng nhanh, taxi không thể phụ thuộc hoàn toàn vào mô hình sạc tập trung như xe buýt, mà cần một mạng lưới sạc phân tán và linh hoạt.

Thứ ba, mô hình tổ chức thị trường taxi, bao gồm doanh nghiệp vận tải và các nền tảng gọi xe công nghệ, có ảnh hưởng lớn đến tốc độ điện hóa. Các đội xe quy mô lớn có khả năng chuyển đổi nhanh hơn nhờ lợi thế về vốn, quản lý và khả năng tiếp cận hạ tầng.

Thứ tư, taxi điện đối mặt với thách thức đặc thù (áp lực về thời gian sạc, rủi ro về phạm vi hoạt động (range anxiety) và sự phụ thuộc vào hạ tầng công cộng). Do thị trường taxi mang tính phân tán, việc áp dụng các công cụ chính sách mang tính bắt buộc thường gặp nhiều khó khăn hơn so với xe buýt.

Từ góc độ chính sách, các nghiên cứu quốc tế cho thấy điện hóa taxi đạt hiệu quả cao nhất khi tập trung vào các khu vực có nhu cầu lớn và ổn định như sân bay, trung tâm đô thị và khu du lịch và kết hợp ưu tiên khai thác, hỗ trợ hạ tầng sạc và cơ chế tài chính xanh.

2.3. Thực trạng điện hóa xe buýt và taxi và nhận định cho Việt Nam

Việt Nam đã bước đầu hình thành xu hướng điện hóa GTCC, với sự phát triển rõ nét tại các đô thị lớn như Hà Nội và TP.HCM.

Đối với xe buýt, quá trình điện hóa đang được triển khai theo kế hoạch và có sự điều phối mạnh của chính quyền địa phương. Tại Hà Nội, theo số liệu của Sở Xây dựng, tính đến hết tháng 5/2026, tổng số phương tiện xe buýt đang hoạt động trên địa bàn Thành phố là 2.210 xe, trong đó có 803 xe sử dụng năng lượng sạch, gồm 139 xe buýt CNG và 664 xe buýt điện, chiếm 36,3%. Theo Kế hoạch số 149/KH-UBND ngày 28/5/2025 về triển khai thực hiện Đề án phát triển hệ thống giao thông vận tải công cộng bằng xe buýt sử dụng điện, năng lượng xanh trên địa bàn Thành phố, tỷ lệ chuyển đổi sang xe buýt điện, năng lượng xanh dự kiến đạt 34 - 39% vào năm 2027, 47 - 54% vào năm 2028, 79 - 89% vào năm 2029 và 100% vào năm 2030.

Tại TP.HCM, theo Trung tâm Quản lý GTCC thuộc Sở Xây dựng Thành phố, tính đến hết tháng 5/2026, hiện có khoảng 2.432 xe buýt đang hoạt động, trong đó 1.367 xe sử dụng năng lượng sạch, gồm 182 xe sử dụng khí nén CNG và 1.185 xe sử dụng điện, chiếm gần 56,2% tổng số phương tiện.

Đối với taxi, quá trình chuyển đổi diễn ra nhanh hơn và mang tính thị trường rõ nét. Tính đến hết tháng 5/2026, tại Hà Nội, theo số liệu của Sở Xây dựng, hiện có 16.083 xe taxi đang hoạt động, trong đó 9.245 xe taxi điện, tương ứng khoảng 57,5% tổng số taxi. Tại TP.HCM, theo số liệu của Sở Xây dựng, hiện có 22.383 xe taxi đang hoạt động, trong đó 19.222 xe taxi điện, tương ứng khoảng 86% tổng số taxi trên địa bàn.

Từ các kết quả nghiên cứu trên, có thể rút ra một số nhận định tổng hợp như sau:

Thứ nhất, điện hóa GTCC đang trở thành xu hướng rõ nét, được thúc đẩy đồng thời bởi yêu cầu giảm phát thải, cải thiện chất lượng không khí, tiến bộ công nghệ và hiệu quả kinh tế trong khai thác. Tuy nhiên, tốc độ chuyển đổi không đồng đều, phụ thuộc vào đặc điểm vận hành của từng loại hình phương tiện, điều kiện hạ tầng và cơ chế chính sách tại từng địa phương.

Thứ hai, xe buýt và taxi thể hiện hai mô hình điện hóa khác nhau. Điện hóa xe buýt chủ yếu được triển khai theo kế hoạch, lộ trình và cơ chế hỗ trợ của Nhà nước, đòi hỏi sự phối hợp đồng bộ giữa phương tiện, hạ tầng sạc, mạng lưới tuyến và trợ giá. Trong khi đó, chuyển đổi taxi diễn ra nhanh hơn, mang tính thị trường rõ nét và chịu tác động trực tiếp của chi phí vận hành, chiến lược của doanh nghiệp và khả năng tiếp cận hạ tầng sạc.

Thứ ba, tại Việt Nam, quá trình điện hóa xe buýt và taxi đã đạt những kết quả đáng kể tại Hà Nội và TP.HCM. Tỷ lệ xe buýt sử dụng điện, năng lượng sạch đã đạt trên 36% tại Hà Nội và trên 56% tại TP.HCM; tỷ lệ taxi điện tương ứng đạt khoảng 57,5% và 86%. Kết quả này cho thấy quá trình chuyển đổi tại các đô thị lớn đã vượt qua giai đoạn thí điểm và đang từng bước được mở rộng. Tuy nhiên, mức độ chuyển đổi giữa các loại hình phương tiện và giữa các địa phương vẫn chưa đồng đều; các khó khăn về hạ tầng sạc, vốn đầu tư và cơ chế hỗ trợ tiếp tục ảnh hưởng đến khả năng nhân rộng trên phạm vi cả nước.

Thứ tư, để duy trì và mở rộng kết quả chuyển đổi, cần chuyển từ cách tiếp cận riêng lẻ theo phương tiện sang cách tiếp cận hệ thống, gắn lộ trình chuyển đổi phương tiện với phát triển hạ tầng sạc, cung

[2] *UITP Large-scale bus electrification the impact on business models*

ứng điện, cơ chế tài chính và quy hoạch giao thông đô thị. Đồng thời, cần xây dựng công cụ chính sách phù hợp với đặc điểm của từng loại hình, trong đó xe buýt cần sự dẫn dắt và hỗ trợ mạnh của Nhà nước, còn taxi cần tập trung tạo môi trường cạnh tranh, giảm chi phí chuyển đổi và mở rộng khả năng tiếp cận hạ tầng sạc.

3. ĐỀ XUẤT KHUNG CHÍNH SÁCH THÚC ĐẨY ĐIỆN HÓA GTCC TẠI VIỆT NAM (XE BUÝT VÀ TAXI)

3.1. Đề xuất quan điểm xây dựng khung chính sách

Thứ nhất, điện hóa GTCC phải được nhìn nhận như một quá trình chuyển đổi hệ thống. Chính sách cần bao quát đồng thời các cấu phần của hệ sinh thái vận tải đô thị, bao gồm phương tiện, hạ tầng sạc, tổ chức vận hành, cơ chế tài chính và thể chế quản lý.

Thứ hai, phân định hợp lý giữa vai trò của Nhà nước và thị trường: Nhà nước cần tập trung vào việc kiến tạo thể chế, ban hành tiêu chuẩn, hỗ trợ tài chính có mục tiêu và điều tiết thị trường; khu vực tư nhân đóng vai trò chủ đạo trong đầu tư, vận hành và đổi mới công nghệ. Đối với xe buýt điện, Nhà nước giữ vai trò trung tâm thông qua cơ chế đặt hàng, trợ giá và tổ chức mạng lưới; đối với taxi điện, chính sách cần dựa thị trường và động lực chi phí.

Thứ ba, bảo đảm chính sách theo đặc thù từng loại hình phương tiện: Xe buýt và taxi có sự khác biệt căn bản về mô hình vận hành, cơ chế tài chính và cấu trúc thị trường, đòi hỏi phải thiết kế các công cụ chính sách riêng biệt nhưng có sự liên kết trong tổng thể chiến lược.

Thứ tư, kết hợp hài hòa giữa mục tiêu môi trường và hiệu quả kinh tế. Điện hóa GTCC không chỉ nhằm giảm phát thải mà còn phải nâng cao chất lượng dịch vụ, hiệu quả vận hành và tính bền vững tài chính của hệ thống vận tải công cộng.

Thứ năm, bảo đảm tính khả thi và lộ trình thực hiện phù hợp với điều kiện Việt Nam, cần được thiết kế linh hoạt, có khả năng thí điểm, điều chỉnh và mở rộng dần, tránh áp đặt mục tiêu quá cao khi các điều kiện nền tảng chưa đầy đủ.

3.2. Khung chính sách ưu đãi và phát triển phương tiện điện

Thứ nhất, chính sách đối với sản xuất, lắp ráp và nhập khẩu phương tiện: (1) Hoàn thiện hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật đối với xe buýt điện và taxi điện, gồm tiêu chuẩn an toàn pin, tiêu chuẩn sạc, tiêu chuẩn vận hành trong điều kiện Việt Nam; (2) áp dụng các ưu đãi thuế có mục tiêu, bao gồm: Duy trì mức thuế tiêu thụ đặc biệt thấp đối với xe điện; miễn, giảm thuế nhập khẩu đối với linh kiện và công nghệ lõi chưa sản xuất trong nước; (3) khuyến khích nội địa hóa sản xuất, thông qua chính sách tín dụng ưu đãi, hỗ trợ nghiên cứu - phát triển và liên kết chuỗi giá trị trong nước.

Thứ hai, chính sách thúc đẩy đổi mới công nghệ: (1) Khuyến khích phát triển công nghệ pin, công nghệ sạc nhanh, hệ thống quản lý năng lượng; (2) hỗ trợ các doanh nghiệp tham gia nghiên cứu, thử nghiệm và thương mại hóa các giải pháp công nghệ trong lĩnh vực vận tải điện; (3) tăng cường hợp tác quốc tế trong chuyển giao công nghệ và tiêu chuẩn hóa.

3.3. Chính sách hỗ trợ doanh nghiệp vận tải chuyển đổi phương tiện

Thứ nhất, chính sách tài chính: (1) Thiết lập các gói tín dụng ưu đãi dài hạn cho doanh nghiệp vận tải đầu tư xe điện; (2) hỗ trợ lãi suất vay hoặc bảo lãnh tín dụng đối với các dự án chuyển đổi đội xe; (3) xây dựng cơ chế trợ giá phù hợp đối với xe buýt điện: Điều chỉnh đơn giá trợ giá theo chi phí vòng đời; tính đến chi phí đầu tư hạ tầng sạc và thay pin; (4) nghiên cứu cơ chế chia sẻ rủi ro, đặc biệt đối với biến động giá pin và giá trị còn lại của phương tiện.

Thứ hai, chính sách tổ chức vận hành: (1) Đối với xe buýt: Ưu tiên đấu thầu/đặt hàng các tuyến xe buýt sử dụng điện; thiết kế hợp đồng dài hạn phù hợp với vòng đời phương tiện và pin; tách bạch giữa sở hữu tài sản (xe, trạm sạc) và vận hành dịch vụ; (2) Đối với taxi: Áp dụng cơ chế cấp phép gắn với tỷ lệ xe điện; ưu tiên tiếp cận các khu vực khai thác có nhu cầu cao (sân bay, trung tâm đô thị); tích hợp taxi điện vào hệ sinh thái vận tải đô thị.

3.4. Khung chính sách phát triển hạ tầng sạc

Thứ nhất, hoàn thiện thể chế và tiêu chuẩn kỹ thuật: Ban hành tiêu chuẩn quốc gia về trạm sạc, kết nối lưới điện và an toàn vận hành và trách nhiệm giữa ngành Giao thông vận tải và ngành Điện lực.

Thứ hai, chính sách tài chính và đất đai: Ưu đãi đầu tư doanh nghiệp phát triển hạ tầng sạc; bố trí quỹ đất cho trạm sạc tại depot, bến xe, khu đô thị; hỗ trợ chi phí kết nối lưới điện.

Thứ ba, phát triển mô hình hạ tầng sạc đa dạng: Sạc tập trung tại depot đối với xe buýt; sạc nhanh công cộng đối với taxi; khuyến khích mô hình xã hội hóa và PPP đầu tư hạ tầng.

4. KẾT LUẬN

Điện hóa GTCC là xu hướng tất yếu trong bối cảnh phát triển bền vững. Nghiên cứu cho thấy xe buýt và taxi có đặc điểm điện hóa khác nhau, đòi hỏi các cách tiếp cận chính sách khác biệt. Tại Việt Nam, mặc dù đã đạt được những kết quả bước đầu, quá trình điện hóa vẫn cần một khung chính sách đồng bộ và dài hạn và triển khai hiệu quả khung chính sách này sẽ góp phần không chỉ giảm phát thải mà còn thúc đẩy GTCC theo hướng hiện đại và hiệu quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] International Energy Agency. Global EV Outlook 2025. Paris, France: IEA, 2024. Internet: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025 (accessed: 8/2026).

[2] Government of India. Grand Challenge for Electric Bus Deployment. New Delhi, India, 2022 (accessed: 8/2026).

[3] World Bank. The Economics of Electric Vehicles for Passenger Transportation. Washington, DC, USA: World Bank, 2022. Internet: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/6a91b1a6-63bf-424d-a34a-79e351ab1f7e (accessed: 8/2026).

[4] BloombergNEF. Electric Vehicle Outlook 2024. New York, USA: Bloomberg Finance L.P., 2024. Internet: https://www.bloomberg.com/professional/insights/webinar/bloombergnefs-electric-vehicle-outlook-2024/ (accessed: 8/2026).

[5] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo đề xuất chính sách hỗ trợ chuyển đổi sang xe ô tô điện, kèm theo Văn bản số 12093/BGTVT-KHCN&MT ngày 07/11/2024 trình Thủ tướng Chính phủ, Hà Nội, 2024.

[6] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo đánh giá tình hình thực hiện Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 của Thủ tướng Chính phủ, Hà Nội, 2024.

[7] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo đề xuất chính sách khuyến khích chuyển đổi phương tiện sang sử dụng điện đối với các tuyến vận tải hành khách bằng xe buýt liên tỉnh và tuyến cố định, Hà Nội, 2025.

[8] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo xây dựng Kế hoạch hành động tăng trưởng xanh ngành Giao thông vận tải giai đoạn 2021 - 2030, Hà Nội, 8/2020.

[9] Tổng công ty Vận tải Hà Nội (Transerco). Báo cáo đề án chuyển đổi phương tiện sử dụng năng lượng điện, năng lượng xanh giai đoạn 2024 - 2035, Hà Nội, 2024.

■ Ngày nộp bài: 07/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 18/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 05/10/2026

Đánh giá tốc độ vận hành trên một số tuyến quốc lộ khu vực Đồng bằng Bắc Bộ và định hướng xác định tốc độ khai thác cho các tuyến đường bộ ở Việt Nam

Assessment of operating speeds on selected national highways in the Borthern Delta Region and orientations for determining operational speeds for roads in Vietnam

> TS TRẦN NGỌC HUY[1], TS BÙI NGỌC HƯNG[1], TS ĐẶNG MINH TÂN[2,*], THS VŨ QUANG HUY[2], KS TRỊNH VIỆT HOÀNG[1], KS ĐẶNG TRẦN TUẤN[1]

[1]Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải

[2]Trường Đại học Giao thông vận tải

[*]Email: tandang@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Việt Nam hiện thiếu một khung tiêu chí kỹ thuật thống nhất để chuyển hóa dữ liệu tốc độ vận hành thành giới hạn tốc độ phù hợp với điều kiện khai thác. Bài báo đề xuất khung luận chứng gồm 4 nhóm tiêu chí: Tốc độ vận hành, hình học tuyến, điều kiện khai thác và ràng buộc an toàn, kết hợp với quy trình kiểm chứng trước-sau khi áp dụng. Khung được xây dựng chủ yếu trên cơ sở tham chiếu JTG/T 3381-02-2020 của Trung Quốc và được kiểm chứng bằng dữ liệu tốc độ tự do tại 16 vị trí trên 3 quốc lộ: QL10, QL18 và QL38. Kết quả cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa tốc độ vận hành và tốc độ cho phép tại các vị trí khảo sát, qua đó cho thấy nhu cầu xem xét đồng thời đặc điểm tuyến, điều kiện khai thác và yêu cầu an toàn khi xác lập tốc độ. Bài báo đề xuất cơ sở kỹ thuật cho việc xây dựng hướng dẫn quản lý tốc độ khai thác trên quốc lộ Việt Nam, gắn với dữ liệu thực tế và khả năng kiểm chứng sau áp dụng.

Từ khóa: Tốc độ khai thác; tốc độ vận hành; giới hạn tốc độ; quản lý tốc độ; V85.

ABSTRACT

Vietnam currently lacks a unified technical framework for translating observed vehicle speeds (operating speeds) into speed limits that are appropriate for actual road and traffic conditions. This paper proposes a justification framework comprising four groups of criteria: operating speed, road geometry, operating conditions and safety constraints, together with a before-and-after verification procedure. The framework is developed primarily with reference to China's JTG/T 3381-02-2020 and is examined using free-flow speed data collected at 16 locations on three national highways, namely QL10, QL18 and QL38. The results indicate considerable differences between operating speeds and speed limits at the surveyed locations, demonstrating the need to consider road characteristics, operating conditions and safety requirements simultaneously when determining operational speeds. The paper provides a technical basis for developing guidelines for operational-speed management on national highways in Vietnam, supported by field data and post-implementation verification.

Keywords: Operational speed; operating speed; speed limit; speed management; V85.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mạng lưới quốc lộ vùng Đồng bằng Bắc Bộ đóng vai trò huyết mạch nhưng chịu tác động mạnh của đô thị hóa, tạo ra điều kiện vận hành đan xen phức tạp giữa các đoạn trong và ngoài khu dân cư. Hiện nay, tốc độ khai thác được điều chỉnh theo Luật Đường bộ 2024 [1] và Thông tư 38/2024/TT-BGTVT [2], quy định mức tối đa mặc định theo vị trí, loại đường, chủng loại phương tiện, đồng thời cho phép đặt biển báo riêng theo thực tế.

Tuy nhiên, hệ thống văn bản hiện hành chưa quy định bộ tiêu chí kỹ thuật thống nhất để chuyển hóa dữ liệu vận hành thành tốc độ khai thác hợp lý; việc điều chỉnh tại các đoạn bất lợi cũng thiếu phương pháp, dữ liệu và ngưỡng định lượng làm căn cứ áp dụng [2].

Do đó, việc thiết lập tốc độ khai thác còn thiếu luận chứng tường minh và cơ chế đánh giá sau điều chỉnh.

Thay vì chủ yếu dựa vào V_{85} để khuyến nghị theo kinh nghiệm, nghiên cứu này xây dựng khung luận chứng dựa trên 4 nhóm tiêu chí. Dữ liệu khảo sát trên QL18, QL10 và QL38 được sử dụng làm trường hợp nghiên cứu nhằm nhận diện bất cập thực tiễn và minh họa việc vận dụng khung luận chứng kết hợp quy trình kiểm chứng trước-sau (Before-After).

Nghiên cứu tập trung vào 3 mục tiêu chính:

- Hệ thống hóa cơ sở khoa học và kinh nghiệm quốc tế về xác định tốc độ khai thác hợp lý;
- Phân tích tốc độ vận hành trên 3 tuyến quốc lộ để nhận diện các vấn đề thực tiễn;
- Đề xuất khung luận chứng và quy trình kiểm chứng trước-sau, làm cơ sở xây dựng hướng dẫn kỹ thuật quản lý tốc độ khai thác cho đường bộ Việt Nam.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC XÁC ĐỊNH TỐC ĐỘ KHAI THÁC HỢP LÝ

Việc xác định tốc độ khai thác hợp lý đòi hỏi một hệ thống lý luận chặt chẽ, kết hợp hài hòa giữa các nguyên tắc kỹ thuật chuẩn mực và điều kiện hạ tầng thực tế. Mục này trình bày khung cơ sở khoa học làm nền tảng cho việc đề xuất các giải pháp kỹ thuật trong bài báo.

2.1. Khái niệm và mối quan hệ giữa các loại tốc độ

Trước hết, cần làm rõ bản chất và sự tương quan giữa các chỉ tiêu tốc độ. Tốc độ khai thác (V_{kt}) là giá trị giới hạn tối đa hoặc tối thiểu cho phép, mang bản chất pháp lý - kỹ thuật theo Luật Đường bộ 2024. V_{kt} phân biệt với tốc độ thiết kế (V_{tk}), tốc độ cho phép hiện hữu (V_{cp}) và tốc độ vận hành (V_{vh}) đo tại hiện trường dưới dạng phân bố dòng xe tự do. Do các tuyến nghiên cứu đã đưa vào khai thác, bài báo chọn V_{kt} và V_{vh} làm hai trục phân tích chính, trong đó V_{85} là thước đo đại diện cốt lõi cho V_{vh} [4-6].

2.2. Cơ sở lựa chọn tốc độ vận hành và các nguyên tắc xác định tốc độ khai thác

Tốc độ vận hành (V_{vh}) được chọn làm dữ liệu đầu vào vì phản ánh hành vi người lái; V_{85} là thước đo phổ biến nhất [4-6]. NCHRP (Hoa Kỳ) chỉ ra tốc độ cho phép chỉ giải thích ~30% biến thiên V_{vh}, 70% phụ thuộc hạ tầng và môi trường [5], trong khi FHWA và Hệ thống an toàn khẳng định V_{85} không phải yếu tố quyết định duy nhất [6-8]. Kinh nghiệm quốc tế (NCHRP [5], MUTCD [6], Anh [9], Austroads [7]) xác lập 4 nguyên tắc cốt lõi: Quản lý theo đoạn đồng nhất [6, 10], phân biệt giới hạn mặc định và riêng [6], luận chứng đa yếu tố [4, 6 - 7, 9] và kiểm chứng sau áp dụng [11]. Nghiên cứu này tham khảo Quy phạm JTG/T 3381-02-2020 (Trung Quốc) làm căn cứ chính nhờ quy trình kỹ thuật khép kín và khả năng tích hợp phân tích phân bố tốc độ vận hành, đánh giá tính đồng nhất dòng xe và kiểm soát ngưỡng an toàn trước khi công bố giá trị [10].

2.3. Bốn nhóm tiêu chí luận chứng tốc độ khai thác

Từ 4 nguyên tắc trên, bài báo xây dựng khung luận chứng gồm 4 nhóm tiêu chí, kế thừa logic nghiên cứu của Viện Khoa học và Công nghệ GTVT [12]: (i) Tốc độ vận hành (V_{15}, trung bình, V_{85}, độ lệch chuẩn) xác định tốc độ nền; (ii) V_{tk} và hình học tuyến kiểm tra khả năng đáp ứng; (iii) điều kiện khai thác phản ánh bối cảnh vận hành và các yếu tố ảnh hưởng đến tốc độ [5]; (iv) các ràng buộc an toàn xác định giới hạn chịu đựng va chạm [7-8]. Bốn nhóm có quan hệ tương tác: Điều kiện khai thác giúp giải thích biến động của V_{85}, trong khi ràng buộc an toàn có thể loại trừ trị số vượt ngưỡng an toàn [5, 7-8]. Do đó, V_{kt} chỉ được xác lập sau khi xem xét đầy đủ 4 nhóm tiêu chí theo trình tự đề xuất.

2.4. Vấn đề thực trạng và yêu cầu đối với điều kiện đường bộ Việt Nam

Tại Việt Nam, tốc độ khai thác gồm mức mặc định theo loại đường, hình học và phương tiện [2, 13] và mức riêng theo điều kiện thực tế [2]. Tuy nhiên, còn một số khoảng trống: (i) Thiếu quy trình định lượng thống nhất để lựa chọn tốc độ riêng [2, 6, 10]; (ii) chưa quy định rõ khảo sát tốc độ dòng tự do và đánh giá sau áp dụng [2, 4, 10]; (iii) mức mặc định chưa được đối chiếu hệ thống với ngưỡng an toàn va chạm [2, 7]; (iv) chưa có yêu cầu định lượng rõ về vùng chuyển tiếp khi giảm tốc vào khu đông dân cư [10-11]; (v) các nghiên cứu trong nước như Dốc Cun, IHSDM chủ yếu dừng ở phân tích thống kê [14-15]. Dữ liệu 3 tuyến được sử dụng để kiểm chứng các khoảng trống và xây dựng khung luận chứng phù hợp với điều kiện Việt Nam.

3. KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ TỐC ĐỘ VẬN HÀNH TRÊN CÁC TUYẾN NGHIÊN CỨU

3.1. Phương pháp và dữ liệu khảo sát

Ba quốc lộ QL10, QL18 và QL38 được chọn làm nghiên cứu điển hình vì đại diện cho quốc lộ hai làn phổ biến ở Đồng bằng Bắc Bộ, có cả đoạn ngoài và trong khu dân cư. Khảo sát tại 16 vị trí: 4 trên QL10, 6 trên QL18 và 6 trên QL38 (Bảng 2, Hình 1).

Hình 2 minh họa hiện trường khảo sát. Phương pháp thu thập dữ liệu là quay video bằng camera tại hiện trường; số liệu tốc độ được xử lý bằng phần mềm phân tích hình ảnh sử dụng trí tuệ nhân tạo [16], kết hợp đo đạc yếu tố hình học và tình trạng mặt đường tại vị trí khảo sát. Số liệu là tốc độ tự do của xe cơ giới ô tô, loại bỏ quan trắc bị ùn tắc hay cưỡng bức [12]. JTG/T 3381-02-2020 yêu cầu cỡ mẫu tối thiểu 65 xe (giới hạn 50 km/h) hoặc 110 xe (80 km/h) [10]. Dữ liệu được thu thập theo một chiều xe chạy và chỉ gồm ô tô con, xe khách, xe tải; xe máy bị loại do đặc điểm vận hành khác biệt có thể làm sai lệch V_{85}. Theo Thông tư 38/2024/TT-BGTVT, tốc độ cho phép còn phân biệt theo loại xe, từ 80 km/h (ô tô con) xuống 50 km/h (xe khách, tải nặng) [2]. Trị số V_{cp} ghi trong Bảng 1 là mức cao nhất (ô tô con) theo quy định, trong khi mẫu khảo sát gộp chung ba loại xe chưa tách riêng, do đó các so sánh V_{85}-V_{cp} dưới đây mang tính tổng quát.

Bảng 1. Đặc trưng các vị trí khảo sát

Tuyến/vị trí	Vị trí	Lý trình	Tốc độ cho phép (km/h)	Số làn đường	Bề rộng mặt đường (m)	Bán kính cong (m)	Khu vực
QL10	POS1	Km5+100	80	2	7,0	Đường thẳng	NGKDC
	POS2	Km4+800	50	2	7,2	745	KDC
	POS3	Km2+000	80	2	7,0	Đường thẳng	NGKDC
	POS4	Km0+800	50	2	10,5	Đường thẳng	KDC
QL18	POS1	Km54+300	80	2	7,0	296	NGKDC
	POS2	Km55+000	80	2	7,0	Đường thẳng	NGKDC

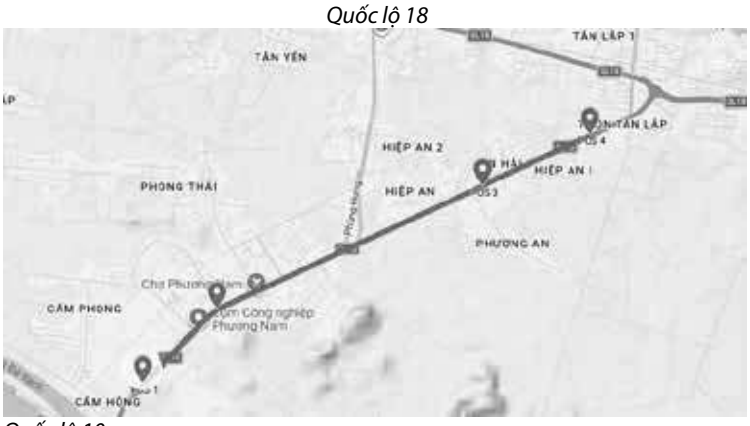
	POS3 (*)	Km56+200	60	4	14,5	487	NGKDC
	POS4 (*)	Km56+800	60	4	14,5	Đường thẳng	NGKDC
	POS5	Km60+200	50	2	7,3	1.842	KDC
	POS6	Km63+800	50	2	7,3	Đường thẳng	KDC
QL38	POS1	Km22+700	80	2	10,3	Đường thẳng	NGKDC
	POS2	Km21+900	80	2	10,5	Đường thẳng	NGKDC
	POS3	Km21+200	50	2	10,5	875	KDC
	POS4	Km15+900	80	2	10,5	360	NGKDC
	POS5	Km13+900	80	2	10,0	765	NGKDC
	POS6	Km15+600	80	2	10,7	Đường thẳng	NGKDC
Chú thích: KDC - Khu dân cư, NGKDC - Ngoài khu dân cư. Các tuyến đường được khảo sát không có dải phân cách cứng. (*) Biển hạn chế tốc độ 60 km/h.							

Dữ liệu tốc độ tự do của xe cơ giới ô tô được xử lý theo từng vị trí với các chỉ tiêu tốc độ lớn nhất, V_{85}, trung bình, V_{15}, nhỏ nhất và độ lệch chuẩn. Kết quả được trình bày tại Bảng 2-4 và Hình 3-5. Tại 16 vị trí, V_{85} dao động 46,77 - 64,02 km/h; trên QL10, QL18 và QL38 lần lượt là 47,39 - 61,26; 49,14 - 64,02 và 46,77 - 59,47 km/h.

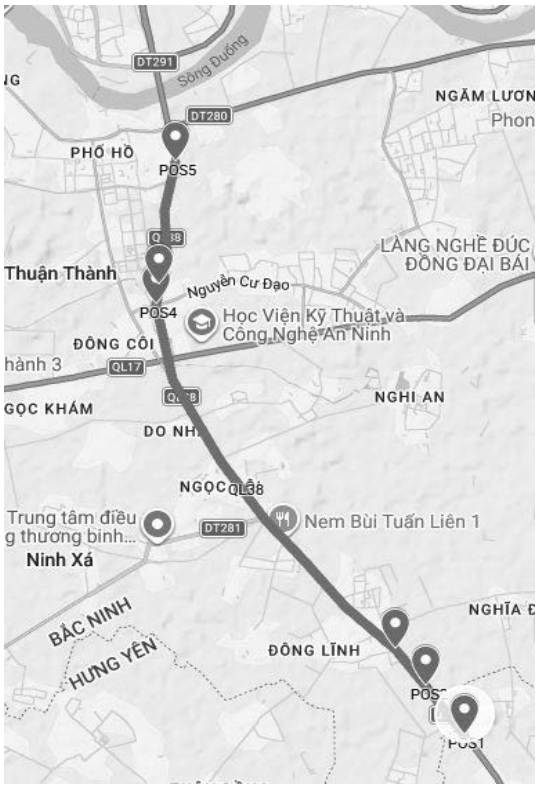
Sự khác biệt về tốc độ diễn ra trong điều kiện khu dân cư và ngoài khu dân cư đan xen, cùng với sự khác nhau về mặt cắt, hình học và điều kiện khai thác. V_{85} cao nhất tại QL18-POS4 (64,02 km/h), là đoạn ngoài khu dân cư, 4 làn xe, rộng 14,5 m và thẳng. Đối chiếu V_{85} với V_{cp} cho thấy tại 9 vị trí có $V_{cp} = 80$ km/h, K_{85} đạt 60,16 - 76,57%; tại 2 vị trí $V_{cp} = 60$ km/h, K_{85} đạt 91,20 - 106,70% và tại 5 vị trí $V_{cp} = 50$ km/h, K_{85} đạt 93,54 - 111,28% (Bảng 5, Hình 6).

Có 3 vị trí V_{85} vượt V_{cp}, gồm QL10-POS4 ($\Delta V_{85} = +4{,}19$ km/h), QL18-POS4 (+4,02 km/h) và QL18-POS5 (+5,64 km/h). Ngược lại, tại các vị trí $V_{cp} = 80$ km/h, V_{85} đều thấp hơn đáng kể so với V_{cp}. Khoảng $V_{85} - V_{15}$ dao động 10,25 - 16,90 km/h và không cho thấy sự khác biệt rõ theo nhóm V_{cp} (Bảng 5). Nhìn chung, mức chênh lệch giữa V_{85} và V_{cp} thay đổi đáng kể giữa các vị trí; tốc độ vận hành không biến đổi đồng nhất theo tốc độ cho phép trong điều kiện khu dân cư và ngoài khu dân cư đan xen. Do đó, việc xác định tốc độ khai thác cần xem xét đồng thời tốc độ vận hành, đặc điểm hình học và điều kiện khai thác của từng đoạn tuyến.

Quốc lộ 18



Quốc lộ 10



Quốc lộ 38

Hình 1. Sơ đồ vị trí khảo sát trên các tuyến quốc lộ

Quốc lộ 10

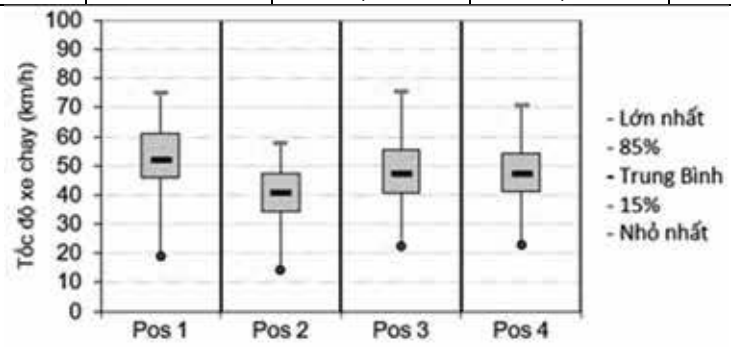
Quốc lộ 18

Quốc lộ 38

Hình 2. Hình ảnh khảo sát hiện trường trên các tuyến quốc lộ

Bảng 2. Thống kê tốc độ vận hành tại các vị trí khảo sát trên QL10

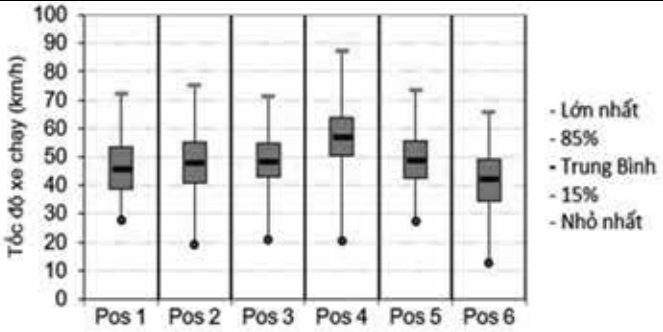
Thông số thống kê	Đơn vị	POS1	POS2	POS3	POS4
Số mẫu	xe	176	175	133	97
Lớn nhất	km/h	75,08	57,99	75,50	70,71
85% (V_{85})	km/h	61,26	47,39	55,58	54,19
Trung bình	km/h	52,28	40,99	47,68	47,56
15% (V_{15})	km/h	45,83	34,50	41,01	41,14
Nhỏ nhất	km/h	18,83	14,41	22,27	22,79
Độ lệch chuẩn		8,37	6,66	8,21	7,63



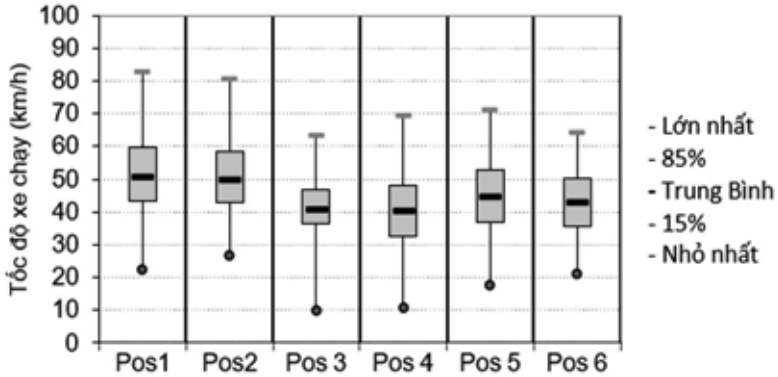
Hình 3. Biểu đồ phân phối tốc độ tại các vị trí khảo sát trên QL10

Bảng 3. Thống kê tốc độ vận hành tại 6 vị trí trên QL18

Thông số thống kê	Đơn vị	POS1	POS2	POS3	POS4	POS5	POS6
Số mẫu	xe	252	177	298	377	102	224
Lớn nhất	km/h	72,17	75,14	71,38	87,42	73,57	65,76
85% (V_{85})	km/h	53,43	55,04	54,72	64,02	55,64	49,14
Trung bình	km/h	46,07	47,87	48,68	57,33	49,08	42,41
15% (V_{15})	km/h	38,67	40,97	42,98	50,49	42,85	34,40
Nhỏ nhất	km/h	27,71	19,14	21,07	20,31	27,20	12,79
Độ lệch chuẩn		7,66	8,69	6,34	8,02	8,14	7,62



Hình 4. Biểu đồ phân phối tốc độ tại các vị trí khảo sát trên QL18



Hình 5. Biểu đồ phân phối tốc độ tại các vị trí khảo sát trên QL38

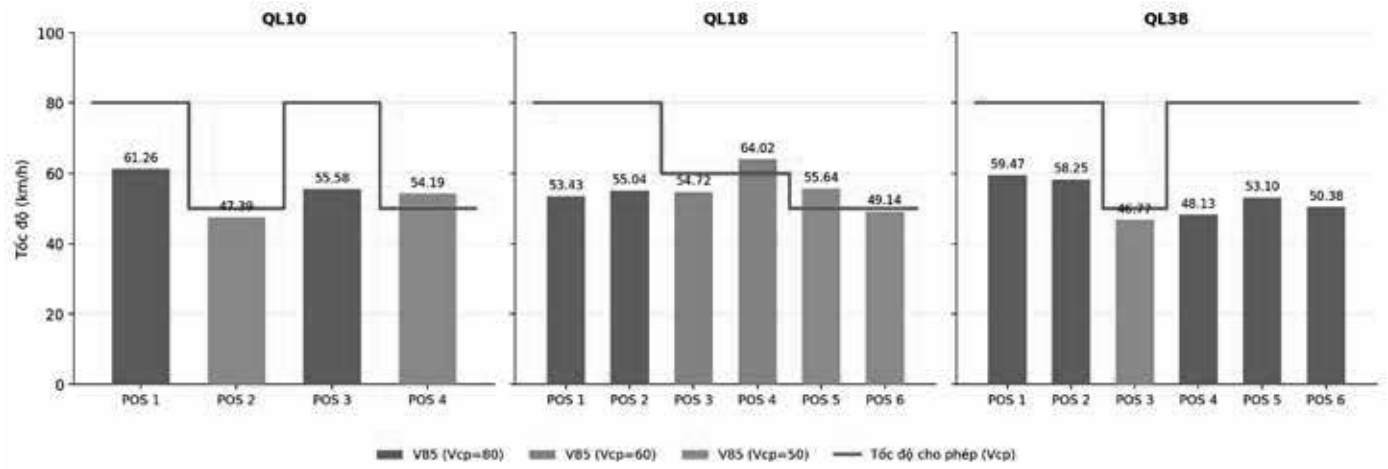
Bảng 4. Thống kê tốc độ vận hành tại 6 vị trí trên QL38

Thông số thống kê	Đơn vị	POS1	POS2	POS3	POS4	POS5	POS6
Số mẫu	xe	189	298	201	294	289	309
Lớn nhất	km/h	82,65	80,65	63,45	60,82	71,10	64,29
85% (V_{85})	km/h	59,47	58,25	46,77	48,13	53,10	50,38
Trung bình	km/h	50,43	49,93	40,83	41,37	46,04	43,00
15% (V_{15})	km/h	42,57	42,86	36,52	34,17	37,88	35,66
Nhỏ nhất	km/h	22,45	26,65	9,71	16,54	20,15	21,27
Độ lệch chuẩn		8,85	8,24	6,57	6,96	7,62	7,58

Bảng 5. Các đại lượng dẫn xuất từ số liệu khảo sát

Tuyến/vị trí	V_{cp} (km/h)	V_{85} (km/h)	ΔV_{85} (km/h)	$K85$ (%)	V_{85}–V_{15} (km/h)
QL10-POS1	80	61,26	−18,74	76,57	15,43
QL10-POS2	50	47,39	−2,61	94,78	12,89
QL10-POS3	80	55,58	−24,42	69,47	14,57
QL10-POS4	50	54,19	+4,19	108,38	13,05
QL18-POS1	80	53,43	−26,57	66,79	14,76
QL18-POS2	80	55,04	−24,96	68,8	14,07
QL18-POS3	60	54,72	−5,28	91,2	11,74
QL18-POS4	60	64,02	+4,02	106,7	13,53
QL18-POS5	50	55,64	+5,64	111,28	12,79
QL18-POS6	50	49,14	−0,86	98,28	14,74
QL38-POS1	80	59,47	−20,53	74,34	16,9
QL38-POS2	80	58,25	−21,75	72,81	15,39
QL38-POS3	50	46,77	−3,23	93,54	10,25
QL38-POS4	80	48,13	−31,87	60,16	13,96
QL38-POS5	80	53,1	−26,9	66,38	15,22
QL38-POS6	80	50,38	−29,62	62,98	14,72

Chú thích: V_{85} là phân vị tốc độ 85% tại vị trí khảo sát; $\Delta V_{85} = V_{85} - V_{cp}$; $K_{85} = (V_{85}/V_{cp}) \times 100\%$. Các đại lượng được tính trực tiếp từ số liệu khảo sát và chỉ sử dụng cho mục đích mô tả



Hình 6. So sánh V85 với tốc độ cho phép tại 16 vị trí trên ba tuyến

3.2. Nhận diện các vấn đề cần luận chứng khi xác định tốc độ khai thác

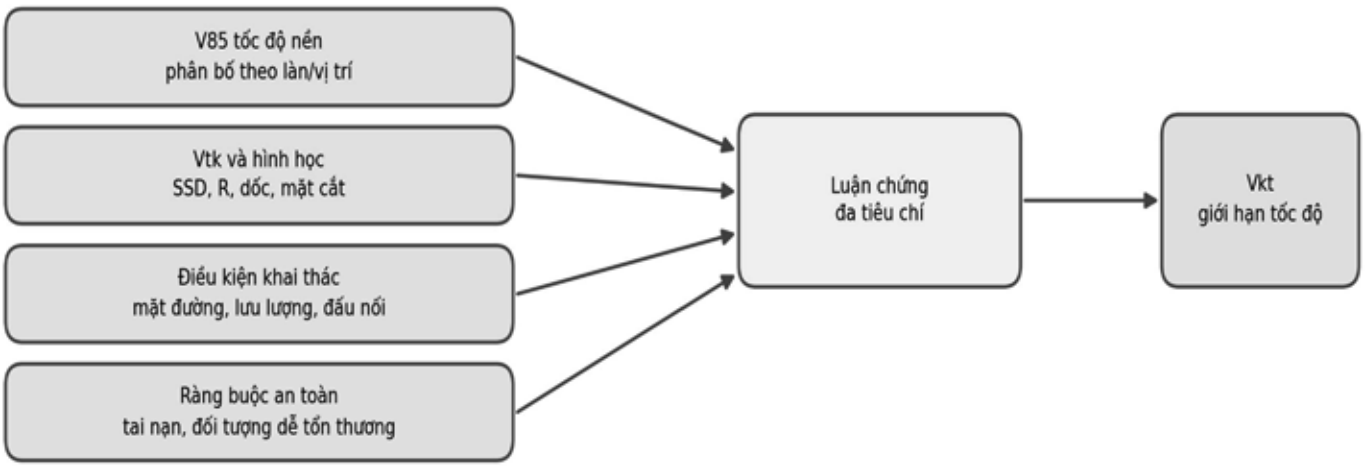
Số liệu khảo sát được xử lý từ tốc độ tự do của ô tô con, xe khách và xe tải, sau khi loại bỏ các trường hợp chịu tác động cưỡng bức. Kết quả tại 16 vị trí cho thấy sự khác biệt giữa tốc độ vận hành và tốc độ cho phép, đồng thời đặt ra 3 vấn đề cần xem xét. Thứ nhất, tại 9 vị trí có tốc độ cho phép ($V_{cp} = 80$ km/h), V_{85} chỉ đạt 60,16 - 76,57% V_{cp}. Mức chênh lệch này cần được xem xét với mặt cắt, lưu lượng, điều kiện ven đường và thành phần phương tiện. Trong đó, mức 80 km/h ở ngoài khu dân cư chỉ áp dụng cho ô tô con, còn xe khách và xe tải có giới hạn thấp hơn. Thứ hai, trong 7 vị trí có $V_{cp} = 50$–60 km/h, có 3 vị trí $V_{85} > V_{cp}$, gồm QL18-POS5 (111,28%), QL10-POS4 (108,38%) và QL18-POS4 (106,70%). Đây là các vị trí cần được xem xét trong luận chứng xác định tốc độ. Thứ ba, dữ liệu về điều kiện khai thác và các ràng buộc an toàn còn thiếu trên cả 3 tuyến, nên chưa thể thực hiện đầy đủ đánh giá đa tiêu chí. Những kết quả trên cho thấy sự khác biệt giữa V_{85} và V_{cp} không đồng nhất giữa các vị trí khảo sát. Tuy nhiên, do chưa tích hợp đầy đủ dữ liệu về tầm nhìn, lưu lượng và tai nạn, các khác biệt quan sát được chưa đủ cơ sở xác định quan hệ nguyên nhân-kết quả. Đây là cơ sở để xây dựng khung luận chứng gồm 4 nhóm tiêu chí và quy trình kiểm chứng trước-sau, thay vì xác định tốc độ chỉ từ V_{85}.

4. ĐỀ XUẤT KHUNG LUẬN CHỨNG VÀ QUY TRÌNH KIỂM CHỨNG TỐC ĐỘ KHAI THÁC

Trên cơ sở 4 nguyên tắc, 4 nhóm tiêu chí và ba vấn đề nhận diện từ trường hợp nghiên cứu của 3 tuyến, mục này trình bày khung luận chứng tốc độ khai thác và quy trình kiểm chứng trước-sau.

4.1. Khung luận chứng xác định tốc độ khai thác

Khung đề xuất tham khảo trình tự kỹ thuật của JTG/T 3381-02-2020 làm cơ sở [10], đồng thời kế thừa logic của thuyết minh đề tài [12]. Bốn nhóm tiêu chí được xem xét đồng thời trước khi xác định V_{kt}, thay vì suy trực tiếp từ V_{85}. Hình 7 thể hiện mối quan hệ giữa tốc độ vận hành, hình học tuyến, điều kiện khai thác và ràng buộc an toàn.



Hình 7. Khung logic luận chứng tốc độ khai thác

Trình tự luận chứng gồm 4 bước: (1) Sử dụng V_{85}, V_{50}, tốc độ trung bình và độ lệch chuẩn để xác định tốc độ nền; (2) đối chiếu với V_{tk}, bán kính cong, siêu cao và tầm nhìn; (3) xem xét mặt đường, lưu lượng, thành phần xe, đấu nối và đặc điểm ven đường để giải thích, hiệu chỉnh tốc độ; và (4) kiểm tra các ràng buộc an toàn [7-8]. Sau 4 bước, xác định khoảng V_{cp} phù hợp và lựa chọn trị số V_{cp}, tham khảo JTG/T 3381-02-2020 [10]. Trước khi áp dụng, kiểm tra tính nhất quán nội bộ giữa các đoạn liền kề, với chênh lệch không quá 20 km/h [10] và tính nhất quán pháp lý theo quy định hiện hành [2]. Trường hợp khác mức mặc định phải có hồ sơ luận chứng làm căn cứ xác lập biển báo.

4.2. Quy trình kiểm chứng trước-sau áp dụng

Phương án V_{kt} sau khi qua các bước trên được kiểm chứng bằng số liệu trước và sau áp dụng. Quy trình gồm 7 bước như Bảng 6: (1) Phân đoạn và khảo sát số liệu nền; (2) phân tích, luận chứng và đề xuất V_{kt}; (3) thẩm định phương án, báo hiệu và vùng chuyển tiếp; (4)

khảo sát lại sau áp dụng tại cùng vị trí và bằng cùng phương pháp và (5) so sánh kết quả để quyết định duy trì, điều chỉnh V_{kt} hoặc bổ sung giải pháp hạ tầng.

4.3. Các chỉ tiêu đánh giá và khả năng áp dụng

Hiệu quả sau áp dụng được đánh giá theo 4 nhóm tiêu chí: Tốc độ vận hành (V_{85}, mức độ phù hợp với V_{kt}); tuân thủ (K_{85}, tỷ lệ vượt V_{kt}) [11]; an toàn (số vụ, mức độ nghiêm trọng tai nạn và các chỉ báo xung đột khi có dữ liệu); điều kiện khai thác (lưu lượng, thành phần xe, mặt đường và các yếu tố liên quan). Khung đề xuất tạo thành chu trình từ khảo sát - luận chứng - áp dụng - kiểm chứng - điều chỉnh, có thể làm cơ sở xây dựng hướng dẫn kỹ thuật quản lý tốc độ ở Việt Nam. Trước khi áp dụng rộng rãi, cần xác định bộ dữ liệu tối thiểu, biểu mẫu luận chứng và kiểm chứng, đồng thời thí điểm trên nhiều loại tuyến và điều kiện khai thác.

Bảng 6. Quy trình đánh giá tốc độ khai thác trên cơ sở số liệu tốc độ vận hành

Bước	Nội dung	Sản phẩm
1	Phân đoạn, khảo sát tốc độ dòng tự do và dữ liệu 4 nhóm tiêu chí	Số liệu nền V_{85}, K_{85}
2	Phân tích và luận chứng V_{kt}	Phương án V_{kt}
3	Thẩm định pháp lý, an toàn và báo hiệu	Phương án áp dụng
4	Đo kiểm sau áp dụng tại cùng vị trí, cùng phương pháp [10]	Số liệu sau áp dụng
5	So sánh trước-sau và quyết định	Duy trì/điều chỉnh

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu tổng hợp kinh nghiệm quốc tế thành 4 nguyên tắc, xây dựng khung luận chứng gồm bốn nhóm tiêu chí kết hợp tham khảo JTG/T 3381-02-2020 làm cơ sở tham chiếu, đồng thời khảo sát và thể hiện phổ tốc độ xe chạy tự do tại 16 vị trí trên QL10, QL18 và QL38. Kết quả cho thấy tại chín vị trí có $V_{cp} = 80$ km/h, V_{85} chỉ đạt 60 - 77% V_{cp}; trong 7 vị trí có $V_{cp} = 50$ - 60km/h, có 3 vị trí $V_{85} > V_{cp}$. Sự khác biệt này cho thấy giới hạn tốc độ không nên được xác định chỉ từ V_{85} hoặc mức mặc định, mà cần xem xét đồng thời hình học, điều kiện khai thác và an toàn.

Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất khung luận chứng 4 nhóm tiêu chí và quy trình kiểm chứng trước-sau, từ khảo sát, xác định tốc độ đến đánh giá và điều chỉnh sau áp dụng. Kết quả là cơ sở để tiếp tục hoàn thiện hướng dẫn xác định tốc độ khai thác cho quốc lộ Việt Nam [12] và chú trọng đặc điểm đô thị hóa đan xen của các tuyến quốc lộ vùng Đồng bằng Bắc Bộ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Luật Đường bộ số 35/2024/QH15, 2024.

[2] Bộ Giao thông vận tải. Thông tư số 38/2024/TT-BGTVT quy định về tốc độ và khoảng cách an toàn của xe cơ giới, xe máy chuyên dùng tham gia giao thông trên đường bộ, 2024.

[3] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 4054:2005 - Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế, 2005.

[4] E. T. Donnell, S. C. Hines, K. M. Mahoney, R. J. Porter, H. McGee. Speed concepts: Informational guide. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-SA-10-001, 2009.

[5] M. A. Brewer, K. Fitzpatrick, E. S. Park, B. Kutela. Designing for target speed, vol.1: Operating speed and road elements. NCHRP Web-Only Document 460, National Academies Press, 2026, doi: 10.17226/29513.

[6] B. Schroeder, M. Neuner, J. Knudsen, P. Ryus, N. Kautz, L. Delich, L. Bedsole. Speed limit setting handbook. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-SA-24-063, 2025.

[7] S. Job, L. Wundersitz. Guide to road safety part 3: Safe speed management. Austroads Publication No. AGRS03-26, Edition 2.1, 2026.

[8] World Health Organization. Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners. 2nd ed., 2023.

[9] Department for Transport. Setting local speed limits. DfT Circular 01/2013, 2024. Internet: https://www.gov.uk/government/publications/setting-local-speed-limits (truy cập: tháng 9/2026).

[10] Bộ Giao thông Vận tải Trung Quốc. Quy phạm thiết kế biển báo giới hạn tốc độ đường bộ (JTG/T 3381-02-2020), 2020.

[11] J. N. Ivan, N. Shirani Bidabadi, O. Olufowobi, N. Eluru, M. Abdel-Aty, T. Bhowmik, S. Pervaz, M. Shirazi, J. C. Jurado. Real-time warnings and variable speed limits: Safety and travel reliability during weather events. NCHRP Research Report 1176, National Academies Press, 2026, doi: 10.17226/29440.

[12] Viện Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải. Nghiên cứu hướng dẫn xác định tốc độ khai thác cho các tuyến đường bộ ở Việt Nam. Thuyết minh đề tài, 2026.

[13] Bộ Giao thông vận tải. QCVN 41:2024/BGTVT - Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về báo hiệu đường bộ, 2024.

[14] N. H. Trần, Q. P. Nguyễn, M. T. Đặng, Q. H. Vũ, T. N. Phan. Ảnh hưởng của các yếu tố hình học đến tốc độ khai thác V85 trên tuyến đường hai làn xe ở Việt Nam: Một nghiên cứu thực nghiệm tại Dốc Cun, QL6, Hòa Bình. Hội nghị KHCN Viện KH&CN GTVT, 2023.

[15] N. H. Trần và cộng sự. Nghiên cứu ứng dụng mô hình IHSDM để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố hình học đến an toàn giao thông đường bộ cho các tuyến đường hai làn xe ngoài đô thị tại Việt Nam. Đề tài Bộ GTVT, mã số DT223004, 2023-2024.

[16] D. M. Tan and L. M. Kieu. TRAMON: An automated traffic monitoring system for high density, mixed and lane-free traffic. IATSS Research, 47(4), 468-481, 2023.

■ Ngày nộp bài: 01/9/2026 ■ Ngày sửa bài: 10/9/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 30/9/2026

Application of LQR, MPC and feedforward control in the lateral control of autonomous vehicles

Ứng dụng LQR, MPC và FD trong điều khiển chuyển động ngang của xe tự hành

> **ASSOC.PROF.DR AN THI HOAI THU ANH*, DR TRAN VAN KHOI**
Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Transport and Communications
*Email: htanh.ktd@utc.edu.vn

ABSTRACT

This paper proposes a combined lateral control strategy integrating Model Predictive Control (MPC), Linear Quadratic Regulator (LQR) and feedforward compensation for autonomous electric vehicles. A two-degree-of-freedom single-track (bicycle) vehicle model describes lateral dynamics and trajectory-tracking errors, including lateral distance and heading errors. The feedforward controller generates an initial steering command based on road curvature to eliminate steady-state lateral error, while the MPC module provides predictive capability to anticipate future trajectory deviations. An LQR controller is then designed to ensure optimal feedback regulation and lateral stability. The proposed control architecture is evaluated through MATLAB/Simulink co-simulation under lane-change and cornering scenarios. Simulation results demonstrate that the integrated MPC-LQR-feedforward controller significantly improves trajectory tracking accuracy and stability compared with conventional LQR and LQR with feedforward compensation. The proposed method achieves a maximum lateral error of less than 0.1 m and a maximum heading error below 0.01 rad, confirming its effectiveness and robustness for autonomous vehicle lateral control.

Keywords: Linear quadratic regulator (LQR); model predictive control (MPC); feedforward control; vehicle lateral control; autonomous electric vehicle.

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một chiến lược điều khiển chuyển động ngang kết hợp bộ điều khiển dự báo theo mô hình (MPC), bộ điều chỉnh toàn phương tuyến tính (LQR) và bù truyền thẳng (feedforward-FD) cho xe điện tự hành. Mô hình xe một vết (mô hình xe đạp) hai bậc tự do được sử dụng để mô tả động lực học ngang và các sai lệch bám quỹ đạo, bao gồm sai lệch về khoảng cách ngang và sai lệch về góc hướng. Bộ điều khiển truyền thẳng tạo ra lệnh góc lái ban đầu dựa trên độ cong của đường nhằm triệt tiêu sai lệch ngang ở trạng thái xác lập, trong khi khối MPC cung cấp khả năng dự báo để lường trước các sai lệch quỹ đạo trong tương lai. Bộ điều khiển LQR được thiết kế nhằm đảm bảo điều chỉnh phản hồi tối ưu và ổn định chuyển động ngang. Cấu trúc điều khiển đề xuất được đánh giá bằng mô phỏng kết hợp trên MATLAB/Simulink trong các kịch bản chuyển làn và vào cua. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển tích hợp MPC-LQR-FD cải thiện đáng kể độ chính xác bám quỹ đạo và tính ổn định so với bộ điều khiển LQR thông thường và LQR có bù truyền thẳng. Phương pháp đề xuất đạt sai lệch ngang cực đại nhỏ hơn 0,1 m và sai lệch góc hướng cực đại dưới 0,01 rad, khẳng định tính hiệu quả và bền vững của phương pháp trong việc điều khiển chuyển động ngang của xe tự hành.

Từ khóa: Bộ điều chỉnh toàn phương tuyến tính (LQR); điều khiển dự báo theo mô hình (MPC); điều khiển truyền thẳng; điều khiển chuyển động ngang; xe điện tự hành.

1. INTRODUCTION

Amid the rapid development of autonomous electric vehicle technologies, numerous universities, research institutes and automotive companies have conducted extensive research on autonomous vehicles. However, vehicle stability control during manoeuvres such as cornering or lane changing remains a critical technical challenge. Many studies have used the single-track (bicycle) model for lateral control because of its simplicity and ease of analysis, while preserving the fundamental vehicle dynamics [1-5]. In real operating environments, vehicles experience variations in

speed, steering angle and tyre-road friction characteristics, which introduce nonlinearities into the system. As a result, maintaining stability becomes difficult when relying solely on classical controllers such as pure PID or LQR. The Linear Quadratic Regulator (LQR) is widely used for stability control because it optimises a cost function that balances control effort and state deviation, providing strong stability performance in the linear operating region [2, 5, 6]. Kebbati et al. (2022) conducted a comprehensive survey of lateral control methods for autonomous vehicles, including optimal control and intelligent control approaches. Their results indicated that LQR offers notable advantages in stability and fast feedback response, but its performance is limited when applied to nonlinear models [7].

Conventional LQR does not directly handle constraints or predict future system states. In contrast, Model Predictive Control (MPC) is distinguished by its ability to predict future states and to explicitly handle state and input constraints, thereby improving trajectory-tracking performance in complex driving scenarios [3, 4]. Lin et al. (2019) designed a lateral control method based on linear time-varying model predictive control combined with vehicle dynamics to determine control parameters for tyre force distribution, ensuring lateral motion stability during trajectory tracking [10]. Kapania and Gerdes (2015) developed a feedback-feedforward steering controller that achieves accurate path tracking while maintaining stability at the limits of handling [1]. Choi et al. (2018) proposed an approximate explicit MPC (AEMPC) method for autonomous vehicle lateral control, in which the control law is precomputed and interpolated online, reducing computational time while maintaining performance comparable to standard MPC [8]. Incorporating a feedforward path into the control structure is an effective approach to reducing transient errors and improving system response during rapid trajectory changes, as feedforward control utilises known reference information to generate the initial control command [2, 5, 9]. When combined with feedback controllers such as LQR or MPC, the system can better cope with state variations and respond more quickly to trajectory changes [6, 10]. However, few studies integrate LQR, MPC, and feedforward control for lateral control of autonomous electric vehicles. Harmoniously integrating these components to ensure stability, trajectory-tracking performance and responsiveness remains a significant challenge because of system nonlinearities and real-time computational constraints. In this study, we propose a combined LQR + MPC + feedforward control architecture for a front-wheel-drive autonomous electric vehicle using a single-track model. The feedforward controller generates the initial steering angle based on the desired trajectory, while MPC and LQR work cooperatively to correct errors and ensure system stability. The vehicle model and control architecture are evaluated through MATLAB/Simulink and CarSim simulations under cornering and lane-change scenarios, using performance metrics such as lateral error, yaw error, stability and control response.

2. VEHICLE MODELLING

The vehicle system is a complex nonlinear system with time-varying, uncertain parameters; therefore, for lateral vehicle motion, this study focuses on the vehicle's lateral dynamics. This paper considers only two degrees of freedom. The vehicle is simplified to a two-degree-of-freedom bicycle model and the longitudinal velocity V_x is assumed constant, as shown in Figure 1.

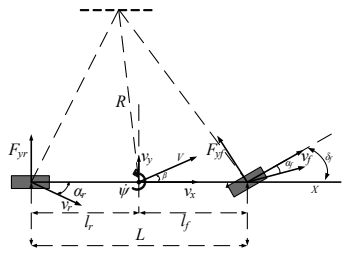


Figure 1. Vehicle kinematic model

By analysing the simplified bicycle model in Figure 1 and applying Newton's laws, the following model equations are obtained:

$$\begin{cases} \sum F_y = ma_y \\ \sum M_z = I_z\ddot{\varphi} \\ ma_y = F_{yf}\cos\delta + F_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_z\ddot{\varphi} = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \quad (2)$$

The tyres interact with the road surface and deform under various manoeuvres, producing longitudinal and lateral tyre forces. Although these forces are nonlinear functions, they are commonly linearised for use in the simplified bicycle model. Linearising tyre forces assumes small slip angles, where slip angle and tyre force are proportional. Typically, the linear operating region for longitudinal slip corresponds to accelerations below 1/2 G, while for lateral slip it corresponds to slip angles below 5° [11]. Under these conditions, the lateral tyre force can be expressed as follows:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{\alpha f}\alpha_f \\ F_{yr} = C_{\alpha r}\alpha_r \end{cases} \quad (3)$$

Vehicles travelling at high speeds generate a lateral slip angle in the tyres. Experimental results show that, at small slip angles, the lateral tyre force is proportional to the slip angle, $F_y = C\alpha$. Based on rigid-body kinematics [12], the expressions for the lateral slip angles of the front and rear wheels can be calculated as follows:

$$tan(\delta_f + \alpha_f) = \frac{\dot{\varphi} l_f + v\sin\beta}{v\cos\beta} = \frac{\dot{\varphi} l_f + v_y}{v_x} \approx \delta_f + \alpha_f$$

$$tan(\alpha_r) = \frac{\dot{\varphi} l_r - v\sin\beta}{v\cos\beta} = \frac{\dot{\varphi} l_r - v_y}{v_x} \approx -\alpha_f \quad (4)$$

From (1), (2), (3) and (4), by linearising the lateral vehicle dynamics equations under the small steering angle assumption (δ is assumed to be small), two lateral dynamic equations are obtained:

$$\begin{cases} ma_y = C_{\alpha f}\left(\frac{l_f\dot{\varphi} + V_y}{V_x} - \delta\right) + C_{\alpha r}\left(\frac{V_y - \dot{\varphi} l_r}{V_y}\right) \\ I_z\ddot{\varphi} = l_f C_{\alpha f}\left(\frac{l_f\dot{\varphi} + V_y}{V_x} - \delta\right) - l_r C_{\alpha r}\left(\frac{V_y - \dot{\varphi} l_r}{V_y}\right) \end{cases} \quad (5)$$

With $V_y = \dot{y}$, the state-space form of the vehicle dynamics during steering can be obtained as follows:

$$\begin{pmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2C_f + 2C_r}{mV_x} & \frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{mV_x} - V_x \\ \frac{2l_f C_f - 2l_r C_r}{I_z V_x} & \frac{2{l_f}^2 C_f + 2{l_r}^2 C_r}{I_z V_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{2C_f}{m} \\ -\frac{2l_r C_r}{I_z} \end{pmatrix} \delta_f \quad (6)$$

When an autonomous vehicle tracks its reference path in real time, distance error and heading error occur due to discrepancies between the planned path and the vehicle's current position. In practice, the controller must eliminate these two errors in real time so the vehicle can follow the planned path. The distance between the vehicle's centre of gravity and the projection point on the road centreline is defined as the lateral error e_d and the deviation between the vehicle orientation and the road heading is defined as the heading error e_θ. Similar tracking-error models are widely used in path-tracking control studies [13, 14].

For the lateral error e_d, its time derivative $\dot{e}_d$ can be calculated as follows:

$$\dot{e}_d = |V|\, sin(\theta - \theta_r) \quad (7)$$

Where:

V: Vehicle speed at the centre of gravity (m/s). Under the small sideslip-angle assumption, $V \approx V_x$;

θ: Actual heading angle of the vehicle;

θ_r: Reference heading angle;

φ: Yaw angle of the vehicle; *β*: sideslip angle at the centre of gravity, so that θ = φ + β;

$e_\varphi = \varphi - \theta_r$: Heading error based on the yaw angle, used in the state vector of Equation (8); $e_\varphi \approx e_\theta$ when β is small.

By transforming the state-space equations of $\ddot{e}_d$ and $\ddot{e}_\varphi$ the entire system can be expressed in the standard state-space form.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_d \\ \ddot{e}_d \\ \dot{e}_\varphi \\ \ddot{e}_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2C_f+2C_r}{mV_x} & -\frac{2C_f+2C_r}{m} & \frac{2l_fC_f-2l_rC_r}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2l_fC_f-2l_rC_r}{I_zV_x} & -\frac{2l_fC_f-2l_rC_r}{I_z} & \frac{2{l_f}^2C_f+2{l_r}^2C_r}{I_zV_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{2C_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{2l_rC_r}{I_z} \end{pmatrix} \delta_f + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2l_fC_f-2l_rC_r}{mV_x} - V_x \\ 0 \\ \frac{2{l_f}^2C_f+2{l_r}^2C_r}{I_zV_x} \end{pmatrix} \dot{\theta}_r \quad (8)$$

By discretising the continuous-time state-space equation of Equation (8), neglecting the influence of the disturbance term $C\dot{\theta}_r$, and integrating both sides of Equation (8), the following result is obtained:

$$\int_t^{t+dt} \dot{X} = \int_t^{t+dt} (AX + BU) \quad (9)$$

Acco

$$X(t+dt) - X(t) = AX(\varepsilon)dt + BU(\varepsilon)dt; \varepsilon \in (t, t+dt) \quad (10)$$

Using the forward Euler method and the backward Euler method for Equation (10), the discretised form is derived as:

$$X(t+dt) = \left(I - \frac{Adt}{2}\right)^{-1} \left(I + \frac{Adt}{2}\right) Xt + BdtU(t) \quad (11)$$

Where:

I: Identity matrix;

dt: Sampling time.

Neglecting the disturbance effect of $C\dot{\theta}_r$, the discrete-time state-space equation of the model describing the vehicle trajectory tracking error can be expressed as follows:

$$X_{k+1} = \bar{A}X_k + \bar{B}U_k \quad (12)$$

Where: $\bar{A} = \left(I - \frac{Adt}{2}\right)^{-1} \left(I + \frac{Adt}{2}\right), \bar{B} = Bdt$

3. DESIGN OF THE LATERAL STABILITY CONTROL SYSTEM

Based on the trajectory tracking error model and the vehicle dynamics model, a lateral motion controller is designed as shown in Figure 2. This controller constrains the lateral distance error and heading error during trajectory tracking, eliminating state deviation between the current position and the autonomous vehicle's reference position. Various strategies have also been applied to the lateral control of autonomous vehicles, including model predictive control [15-17], backstepping and sliding mode control [18] and robust H∞ control [19].

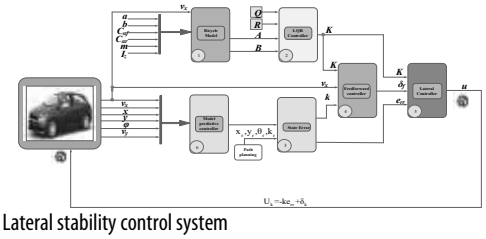


Figure 2. Lateral stability control system

3.1. Predictive controller design

During driving, humans can anticipate situations based on changes in the environment and the upcoming trajectory and apply appropriate steering actions before deviations occur [20-22]. However, the LQR controller with feedforward compensation, based on the vehicle dynamic trajectory-tracking error model, lacks predictive capability.

To overcome this limitation, this study incorporates a predictive controller into the control architecture, enabling the vehicle to anticipate the future target trajectory and act in advance to minimise tracking errors [23].

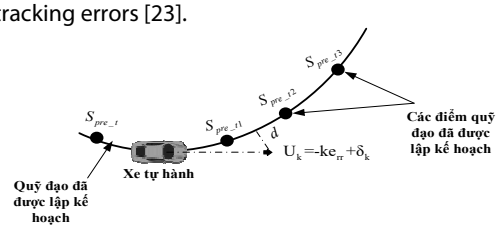


Figure 3. The current vehicle position coincides with the preset position

This control architecture allows the system to initiate steering earlier, improving control effectiveness while enhancing stability and ride smoothness during trajectory tracking. At the prediction instant, the vehicle state information is described by *(x_{pre}, y_{pre}, V_{xpre}, V_{ypre}, φ_{pre})* with $\theta = \varphi + \beta$, the following is obtained:

$$\begin{cases} x_{pre} = x + V_x t_s\, cos(\varphi) - V_y t_s\, sin(\varphi) \\ y_{pre} = y + V_y t_s\, cos(\varphi) - V_x t_s\, sin(\varphi) \\ \varphi_{pre} = \varphi + \dot{\varphi} t_s \\ V_{xpre} = V_x \\ V_{ypre} = V_y \end{cases} \quad (13)$$

3.2. LQR controller design

Once the MPC controller provides the vehicle trajectory, an optimal LQR controller [24, 25] is designed based on the discrete-time state-space model of the vehicle dynamics developed in the previous section. The cost function of the LQR controller is defined as follows:

$$J = \sum_0^\infty [X_k^T Q X_k + U_k^T R U_k] \quad (14)$$

The LQR controller is designed to determine a control law that minimises Equation (14). Therefore, the Hamiltonian function is constructed as follows:

$$H_k = X_k^T Q X_k + U_k^T R U_k + \lambda_k^T (\bar{A}X_k + \bar{B}U_k) \quad (15)$$

The following is obtained by taking the derivative of Equation (15) and solving for the extremum conditions:

$$U_k = -(R + \bar{B}^T P_{k+1} \bar{B})^{-1} \bar{B}^T P_{k+1} \bar{A} X_k \quad (16)$$

Where $\lambda_{k+1} = 2P_{k+1}X_{k+1}$ is the solution of the Riccati equation:

$$P = Q + \bar{A}^T P \bar{A} - \bar{A}^T P \bar{B} (R + \bar{B}^T P \bar{B})^{-1} \bar{B}^T P \bar{A} = 0 \quad (17)$$

The optimal feedback control law is obtained through an iterative process, and the control input of the LQR controller for the autonomous vehicle is determined as follows:

$$U_K = -KX_k \quad (18)$$

Where: K = [k1, k2, k3, k4] is the LQR gain matrix.

$Q = diag[q_1, q_2, q_3, q_4]$, $R = [r]$ are the state and input weighting matrices, respectively.

3.3. Feedforward controller design

If only the LQR controller is used, the system cannot eliminate the steady-state error regardless of the value of K in the state equation. In other words, the system cannot guarantee that the lateral distance error and the heading angle error of the autonomous vehicle will converge to zero during lateral control.

The front-wheel steering controller output is set as a delta controller in steady state to eliminate the front-wheel steering angle

error δ_k. Accordingly, the control output U_k of the system can be expressed as follows:

$$U_k = \delta_f + \delta_k = -KX_k + \delta_k \tag{19}$$

When the system reaches optimal control, that is, when the steady-state error is required to be zero, substituting Equation (19) into Equation (8) and discretising it yields:

$$X_k = -(\bar{A} - \bar{B}K)^{-1}\bar{A}\left(\bar{B}\delta_k + \bar{C}\dot{\theta}_r\right) \tag{20}$$

At this point, Maple computational software is used to derive the system's steady-state error equation.

Where:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2C_f + 2C_r}{mV_x} & -\frac{2C_f + 2C_r}{m} & \frac{2l_fC_f - 2l_rC_r}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2l_fC_f - 2l_rC_r}{I_zV_x} & -\frac{2l_fC_f - 2l_rC_r}{I_z} & \frac{2{l_f}^2C_f + 2{l_r}^2C_r}{I_zV_x} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{2C_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{2l_rC_r}{I_z} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2l_fC_f - 2l_rC_r}{mV_x} - V_x \\ 0 \\ \frac{2{l_f}^2C_f + 2{l_r}^2C_r}{I_zV_x} \end{pmatrix}, K = [k_1, k_2, k_3, k_4]$$

The equation for the system's steady-state error:

$$\begin{bmatrix} e_{d_s} \\ \dot{e}_{d_s} \\ e_{\varphi_s} \\ \dot{e}_{\varphi_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1}\left\{\delta_k - \frac{\theta_r}{V_x}\left[l_f + l_r - l_rk_3 - \frac{mv_x^2}{l_f+l_r}\left(\frac{l_r}{2C_f} + \frac{l_f}{2C_r}k_3 - \frac{l_f}{2C_r}\right)\right]\right\} \\ 0 \\ -\frac{\theta_r}{V_x}\left(l_r + \frac{l_f}{l_f+l_r}\frac{mv_x^2}{2C_f}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{21}$$

Where:

e_{d_s}: The steady-state error of the lateral distance error;

e_{φ_s}: The steady-state error of the heading angle error.

Therefore, a feedforward controller is necessary to eliminate the system's steady-state errors in both the lateral distance error and the heading angle error.

Based on the above analysis, when $e_\varphi = e_\theta$ is applied, the approximated heading error e_φ no longer equals the actual heading error. Through this transformation, the following can be obtained:

$$e_\varphi = -\frac{\theta_r}{V_x}\left(l_r + \frac{l_f}{l_f+l_r}\frac{mv_x^2}{2C_f}\right) \tag{22}$$

And $e_\varphi = \varphi - \theta_r$, $e_\varphi = -\beta$

It can be shown that $e_\varphi = \varphi + \beta - \theta_r = 0$ results in a zero steady-state error for the system's heading angle. Therefore, a feedforward controller for the heading-angle error is not necessary, as it can be eliminated directly.

The steady-state lateral distance error in Equation (21) is eliminated by the feedforward term. When $\theta_r = \rho V_x$ with $e_d = 0$, the feedforward controller is designed according to the corresponding formula and the feedforward control input δ_k is calculated as follows:

$$\delta_k = \rho\left[l_f + l_r - l_rk_3 - \frac{mv_x^2}{l_f+l_r}\left(\frac{l_r}{2C_f} + \frac{l_f}{2C_r}k_3 - \frac{l_f}{2C_r}\right)\right] \tag{23}$$

Where ρ is the road curvature.

4. SIMULATION AND RESULTS

The co-simulation process is carried out in the CarSim-MATLAB/Simulink environment to verify the effectiveness of the proposed controllers. CarSim provides a high-fidelity vehicle dynamics model, while Simulink develops and implements the control algorithms. In CarSim, environmental conditions such as road friction coefficient, vehicle speed and road parameters are configured to simulate realistic driving scenarios. Output signals from CarSim, including lateral position, lateral velocity and vehicle yaw angle, are used as feedback inputs for the control system in Simulink.

The vehicle used in the simulation is a C-class sedan, with parameters calibrated to reflect the dynamic characteristics of a mid-size passenger vehicle. The Simulink sampling time is set to 0.0001s, corresponding to a sampling frequency of 10,000 Hz in CarSim, to ensure synchronisation during co-simulation.

The main vehicle parameters used in the simulation are presented as follows:

- Vehicle mass: 1,600 kg;
- Yaw moment of inertia: 1,800 kg·m^2;
- Front/rear tyre cornering stiffness: 60,000 N/rad and 110,000 N/rad;
- Distance from the centre of gravity (CG) to the front/rear axles: 1.4 m and 1.7 m;
- Wheelbase: 3.1 m;
- Road friction coefficient (μ): 0.85.

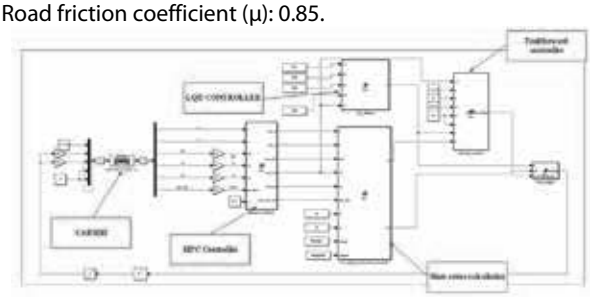


Figure 4. Simulation in MATLAB/Simulink

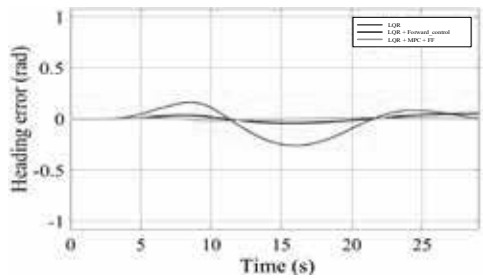


Figure 5. Heading error of the controllers

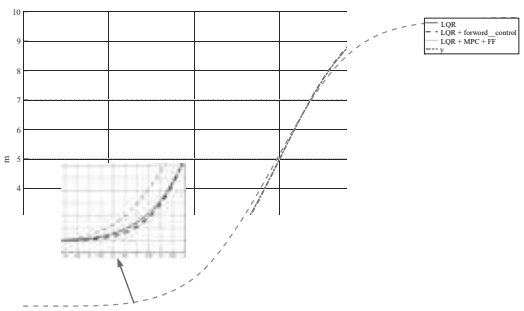


Figure 6. Lateral errors of the controllers

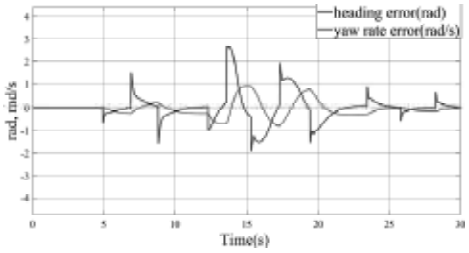


Figure 7. Heading error and yaw rate error of the proposed MPC-LQR-feedforward controller

Simulation results indicate that the LQR controller, combined with feedforward compensation and predictive control, delivers excellent trajectory-tracking performance. As observed in Figures 5 and 6, this controller maintains stable control efficiency during path following, with a maximum lateral error of less than 0.1 m and a maximum heading error of less than 0.01 rad. Figure 7 shows the heading error and yaw rate error of the proposed MPC-LQR-feedforward controller.

The conventional LQR controller performs considerably worse, with a maximum lateral error of 1.7 m and a maximum heading error of 0.22 rad. Meanwhile, LQR with feedforward compensation provides more stable results, with a peak lateral error of about 0.2 m and a heading error of about 0.05 rad during cornering.

5. CONCLUSION

This paper proposed a lateral control strategy for autonomous electric vehicles by integrating Model Predictive Control (MPC), Linear Quadratic Regulator (LQR) and feedforward compensation. The controller was developed using a two-degree-of-freedom bicycle vehicle model to address lateral and heading tracking errors. Simulation results obtained from the CarSim-MATLAB/Simulink co-simulation environment demonstrate that the proposed MPC-LQR-feedforward controller significantly improves trajectory tracking performance compared with conventional LQR-based approaches. The proposed method achieves a maximum lateral error of less than 0.1 m and a maximum heading error below 0.01 rad, indicating high tracking accuracy and stability during lane-change and cornering scenarios.

These results confirm that combining predictive control with optimal feedback and feedforward compensation provides an effective solution for improving the lateral stability and trajectory tracking performance of autonomous vehicles. However, the controller was evaluated at a constant longitudinal speed and a road friction coefficient of 0.85. Future work will investigate its robustness to variations in vehicle speed, road friction and vehicle parameters, and will validate the method experimentally.

REFERENCES

[1] N. R. Kapania, J. C. Gerdes. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling. Vehicle System Dynamics, vol. 53, no. 12, pp. 1687-1704, 2015.

[2] T. Yang, Z. Bai, Z. Li, N. Feng, L. Chen. Intelligent vehicle lateral control method based on feedforward + predictive LQR algorithm. Actuators, vol. 10, no. 9, Art. no. 228, 2021, doi: 10.3390/act10090228.

[3] G. C. Pereira, B. Wahlberg, H. Pettersson, J. Mårtensson. Adaptive reference aware MPC for lateral control of autonomous vehicles. Control Engineering Practice, vol. 132, Art. no. 105403, 2023, doi: 10.1016/j.conengprac.2022.105403.

[4] W. Zhang, J. Wang, T. Pang. Research on the performance of vehicle lateral control algorithm based on vehicle speed variation. World Electric Vehicle Journal, vol. 16, no. 5, Art. no. 259, 2025, doi: 10.3390/wevj16050259.

[5] Z. Zheng, Z. Ye, X. Zheng. Intelligent vehicle lateral control strategy research based on feedforward + predictive LQR algorithm with GA optimisation and PID compensation. Scientific Reports, vol. 14, Art. no. 22317, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-72960-5.

[6] Z. Wang, U. Montanaro, S. Fallah, A. Sorniotti, B. Lenzo. A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment control. Mechatronics, vol. 51, pp. 31-45, 2018, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.01.013.

[7] Y. Kebbati, H. R. Karimi, A. Boulkroune, S. Bououden. Lateral control for autonomous wheeled vehicles: A technical review. Asian Journal of Control, vol. 24, no. 3, pp. 1438-1467, 2022, doi: 10.1002/asjc.2582.

[8] W. Y. Choi, S.-H. Lee, C. C. Chung. Approximate explicit model predictive control for vehicle lateral control. IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 31, pp. 787-792, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.10.124.

[9] S. Schnelle, J. Wang, R. Jagacinski, H.-J. Su. A feedforward and feedback integrated lateral and longitudinal driver model for personalized advanced driver assistance systems. Mechatronics, vol. 50, pp. 177-188, 2018, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.007.

[10] F. Lin, Y. Zhang, X. Liu, J. Wang. A time-varying linear model predictive control approach for vehicle lateral motion considering dynamics. International Journal of Automotive Technology, vol. 20, no. 6, pp. 1353-1364, 2019.

[11] N. H. Amer, H. Zamzuri, K. Hudha, Z. A. Kadir. Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: A review of state of the art and challenges. Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 86, no. 2, pp. 225-254, 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0442-0.

[12] M. A. Abdullah, J. F. Jamil, A. E. Mohan. Vehicle Dynamics Modeling & Simulation, 3rd ed. Centre for Advanced Research on Energy (CARe), Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, 2016.

[13] N. Kang, Y. Han, T. Guan, S. Wang. Improved ADRC-based autonomous vehicle path-tracking control study considering lateral stability. Applied Sciences, vol. 12, no. 9, Art. no. 4660, 2022, doi: 10.3390/app12094660.

[14] Z. Wang, K. Sun, S. Ma, L. Sun, W. Gao, Z. Dong. Improved linear quadratic regulator lateral path tracking approach based on a real-time updated algorithm with fuzzy control and cosine similarity for autonomous vehicles. Electronics, vol. 11, no. 22, Art. no. 3703, 2022, doi: 10.3390/electronics11223703.

[15] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. E. Tseng, D. Hrovat. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 15, no. 3, pp. 566-580, 2007.

[16] F. Tang, C. Li. Intelligent vehicle lateral tracking control based on multiple model prediction. AIP Advances, vol. 10, no. 7, Art. no. 075107, 2020, doi: 10.1063/1.5141506.

[17] V. N. Le, M. C. Tran, V. T. Le, V. D. Dau, V. S. Pham, D. Q. A. Do and D. H. Vu. Trajectory tracking control of automobile motion direction using MPC. Journal of Marine Science and Technology, Special Issue no. 10, pp. 189-194, 2021 (in Vietnamese).

[18] T. H. S. Pham, V. N. Nguyen, Q. H. Duong, M. V. Nguyen and X. M. Phan. Design of control algorithms for autonomous vehicles based on backstepping and sliding mode control techniques, in Proc. 1st National Conference on Dynamics and Control, Da Nang, Vietnam, 2019, pp. 117-120, doi: 10.15625/vap.2019000266 (in Vietnamese).

[19] J. Guo, Y. Luo, K. Li. Robust H∞ fault-tolerant lateral control of four-wheel-steering autonomous vehicles. International Journal of Automotive Technology, vol. 21, pp. 993-1000, 2020, doi: 10.1007/s12239-020-0094-8.

[20] D. H. Weir, D. T. McRuer. Dynamics of driver vehicle steering control. Automatica, vol. 6, no. 1, pp. 87-98, 1970, doi: 10.1016/0005-1098(70)90077-4.

[21] C. C. MacAdam. Understanding and modeling the human driver. Vehicle System Dynamics, vol. 40, no. 1-3, pp. 101-134, 2003, doi: 10.1076/vesd.40.1.101.15875.

[22] T. P. Le and V. T. Cao. A control model for vehicle drivers. Journal of Technical Education Science, vol. 9, no. 4, pp. 57-65, 2014 (in Vietnamese).

[23] Cheng, S., Li, L., Guo, H. Q., Chen, Z. G., & Song, P. Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21(6), pp. 2376-2385, 2020.

[24] Li, H., Li, P., Yang, L., Zou, J., & Li, Q. Safety research on stabilization of autonomous vehicles based on improved-LQR control. AIP Advances, vol. 12, no. 1, Art. no. 015313, 2022, doi: 10.1063/5.0078950.

[25] C. Gokcek, P. T. Kabamba, S. M. Meerkov. An LQR/LQG theory for systems with saturating actuators. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 46, no. 10, pp. 1529-1542, 2001.

■Ngày nhận bài: 03/8/2026 ■Ngày sửa bài: 12/8/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/8/2026

Comparative analysis of the mechanical responses of asphalt pavements under different container truck configurations by using finite element analysis

So sánh ứng xử cơ học của kết cấu mặt đường nhựa dưới tác động của các loại xe rơ moóc khác nhau bằng phương pháp phần tử hữu hạn

> TRAN VU TU, DO DUY THOI, NGUYEN MINH THIEN*
Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh city University of Technology and Engineering
*Email: thiennm25.ncs@hcmute.edu.vn

ABSTRACT

Heavy container trucks can impose substantially different tire–pavement contact conditions, which may lead to different mechanical responses in asphalt pavement structures. This study investigates the effects of tire pressure associated with five container-truck groups defined in the standards, namely WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35, by integrating field survey data with finite element analysis. A total of 400 tire-pressure observations were statistically analyzed to characterize the pressure distribution of each group. The mean tire pressures, ranging from 0.862 MPa for WB-12 to 1.088 MPa for WB-35, were subsequently applied as uniformly distributed contact pressures in an axisymmetric model of a four-layer flexible pavement. The two asphalt layers were modeled using the viscoelastic Huet–Sayegh formulation, whereas the granular base and subgrade were assumed to behave linearly elastically. The pavement responses were evaluated in terms of horizontal displacement (U1), vertical displacement (U2), vertical stress (S22), and vertical strain (E22). The results showed a consistent increase in all mechanical responses with increasing tire pressure. Compared with WB-12, WB-35 increased the maximum horizontal displacement, vertical displacement, vertical compressive stress, and vertical compressive strain by approximately 26.20%, 26.23%, 26.24%, and 26.21%, respectively. The largest responses were concentrated near the loading area and decreased with radial distance and depth. Among the investigated groups, WB-35 produced the most adverse pavement response, indicating that variations in actual tire pressure should be considered when evaluating the mechanical effects of heavy container vehicles on flexible pavements.

Keywords: Asphalt pavement; tire pressure; container truck; finite element analysis; Huet-Sayegh model; pavement response.

TÓM TẮT

Ứng xử của kết cấu áo đường nhựa có sự khác biệt đáng kể đối với các xe rơ moóc có tải trục khác nhau tác động lên mặt đường trong quá trình chuyển động. Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của áp suất lốp đối với năm nhóm xe rơ moóc theo tiêu chuẩn, bao gồm WB-12, WB-15, WB-19, WB-20 và WB-35, lên ứng xử cơ học của kết cấu áo đường bằng cách kết hợp dữ liệu khảo sát thực địa với phương pháp phân tích phần tử hữu hạn. Tổng cộng 400 số liệu quan trắc áp suất lốp đã được phân tích thống kê để xác định đặc điểm phân bố áp suất của từng nhóm. Các giá trị áp suất lốp trung bình (dao động từ 0,862 MPa đối với nhóm WB-12 đến 1,088 MPa đối với nhóm WB-35) sau đó được áp dụng làm áp suất tiếp xúc phân bố đều trong mô hình đối xứng trục của kết cấu mặt đường mềm bốn lớp. Hai lớp bê tông nhựa được mô hình hóa bằng công thức nhớt đàn hồi Huet-Sayegh, trong khi lớp móng cấp phối và lớp nền đất được giả định có ứng xử đàn hồi tuyến tính. Các

ứng xử của kết cấu mặt đường được đánh giá dựa trên các chỉ số: chuyển vị ngang (U1), chuyển vị đứng (U2), ứng suất đứng (S22) và biến dạng đứng (E22). Kết quả cho thấy sự gia tăng đồng bộ của tất cả các ứng xử cơ học khi áp suất lốp tăng lên. So với nhóm WB-12, nhóm WB-35 làm tăng các giá trị cực đại của chuyển vị ngang, chuyển vị đứng, ứng suất nén đứng và biến dạng nén đứng lần lượt là 26,20%, 26,23%, 26,24% và 26,21%. Các ứng xử lớn nhất tập trung gần khu vực chịu tải và giảm dần theo khoảng cách từ tâm ra xa hướng bán kính cũng như chiều sâu. Nghiên cứu cho thấy, nhóm WB-35 gây ra phản ứng bất lợi nhất cho kết cấu mặt đường và sự cần thiết xem xét sự biến thiên của áp suất lốp thực tế khi đánh giá tác động cơ học của xe rơ moóc hạng nặng lên mặt đường mềm.

Từ khóa: Mặt đường bê tông nhựa; áp suất lốp; xe rơ moóc; phần tử hữu hạn; mô hình Huet-Sayegh; kết cấu mặt đường.

1. PROBLEM STATEMENT

The increasing volume of freight transportation by heavy trucks and container vehicles has imposed increasingly demanding requirements on the load-carrying capacity and durability of asphalt pavement structures. Unlike passenger cars, loads from heavy trucks are transferred to the pavement through axle groups and tires carrying relatively large loads, resulting in complex stress and strain states within the pavement layers. These mechanical responses are directly associated with common forms of flexible pavement distress, such as fatigue cracking, permanent deformation, and rutting. Therefore, accurate characterization of the applied loads and the stress distribution within the tire-pavement contact area is essential for analyzing and predicting pavement structural performance. Previous studies have demonstrated that the effects of heavy vehicles on pavement performance depend not only on gross vehicle weight, but also on axle load, axle configuration, tire type, tire inflation pressure, and the characteristics of the tire-pavement contact pressure distribution (Chen et al., 1986, Machemehl et al., 2005, Park et al., 2005). Experimental and numerical studies have shown that the actual contact pressure between the tire and pavement is nonuniform. Using a three-dimensional finite element model, Chen et al. demonstrated that the assumption of uniform contact pressure may result in considerable discrepancies in the prediction of tensile strains in pavement structures under overloaded conditions or high tire pressures. (Chen et al., 1986). Similarly, Park et al. reported that nonuniform tire contact stresses significantly affect both the stress field and permanent deformation of asphalt pavements (Park et al., 2005). These findings indicate that loading conditions representative of actual operating conditions should be considered when evaluating the effects of heavy vehicles on pavement structures.

In addition to wheel load, tire inflation pressure is an important parameter governing vehicle-pavement interaction. Machemehl et al. showed that tire inflation pressure has a significant relationship with tensile strain at the bottom of the asphalt layer and with stresses in the near-surface region (Machemehl et al., 2005). The influence of tire pressure also varies with depth; its effect on vertical strain in the subgrade may become less pronounced, particularly for pavement structures with relatively thick asphalt layers. Tire pressure should not be treated simply as a fixed parameter, but rather as a variable reflecting actual vehicle operating conditions when evaluating pavement mechanical responses. Another important factor is axle configuration and the interaction among individual wheel loads. Different heavy-truck and container-truck configurations may have different numbers of axles, axle spacings, and load distributions among the axles. In mechanistic-empirical pavement design, traffic loading is therefore differentiated into single-, tandem-, tridem-, and other multi-axle configurations, and the locations of critical pavement responses may vary with axle configuration (Zhao et al., 2012). Using a finite element model incorporating the viscoelastic behavior of asphalt materials, Ambassa et al. also demonstrated that multiple-axle loading can significantly influence pavement response and fatigue life (Ambassa et al., 2013). Accordingly, evaluating heavy-vehicle effects solely on the basis of gross vehicle weight may not fully reflect the relative severity of different vehicle groups on pavement structures.

To investigate these phenomena in greater detail, the finite element method (FEM) has been increasingly applied to pavement structural analysis. Several studies have developed three-dimensional finite element models to simulate moving vehicle loads and have shown that pavement stress and strain responses vary considerably with both spatial location and depth (Assogba et al., 2020, Yang et al., 2020). Assogba et al. (2020) developed a three-dimensional finite element model of pavement response under heavy-truck loading and validated it using field measurements (Assogba et al., 2020). Although numerous studies have separately investigated the effects of axle load, tire pressure and wheel configuration, the integration of tire-pressure data collected under actual operating conditions with numerical modeling of different container-truck groups remains a topic requiring further investigation. Therefore, characterizing the statistical distribution of tire pressure for each vehicle group before defining loading conditions in numerical models may provide a more rational linkage between actual operating conditions and pavement mechanical analysis.

2. METHODOLOGY

The study was conducted in three main stages. First, tire-pressure data for the five vehicle groups, namely WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35, were collected and statistically analyzed to characterize the pressure distribution of each group. Second, a finite element model of the flexible pavement structure was developed, in which the two asphalt layers were represented using the viscoelastic Huet–Sayegh model, whereas the graded crushed-stone base and subgrade were assumed to behave as linear elastic materials. Finally, the representative loading parameters for each vehicle group were successively applied to the same pavement model to determine and compare the resulting stress, strain, and displacement fields.

2.1. Collection and statistical analysis of tire-pressure data

Tire-pressure data were collected for the five vehicle groups. A total of 400 observations were included in the analysis, comprising 61 observations for WB-12, 79 for WB-15, 86 for WB-19, 96 for WB-20, and 78 for WB-35. For each group, descriptive statistical parameters, including sample size, mean, standard deviation, minimum, and maximum values, were determined. The mean tire pressure was calculated using Eq. (1)

$$\bar{P} = \sum_1^n P_i / n \quad (1)$$

Where, $\bar{P}$ is the mean tire pressure of a given vehicle group, P_i is the tire pressure of the i, n is the number of observations.

The sample standard deviation was subsequently determined, and the coefficient of variation was calculated to compare the relative variability among the vehicle groups. Frequency distributions and probability density curves were constructed to illustrate differences in tire pressure among the five groups. When the assumption of homogeneity of variance was not satisfied, differences in mean tire pressure among the groups could be examined using Welch's one-way analysis of variance (Welch, 1951). If the overall test indicated a statistically significant difference at ($p<0.05$), the Games–Howell post-hoc test could be applied to identify specific pairwise differences between vehicle groups (Games and Howell, 1976). Following the statistical analysis, representative tire-pressure values for each group were used to define the loading conditions for the finite element simulations.

2.2. Development of the finite element model

Pavement geometry and structural configuration

The pavement structure was modeled using a two-dimensional axisymmetric formulation. This modeling approach is suitable for a uniformly distributed load acting over a circular contact area centered on the axis of symmetry. The numerical domain had a radius of 1.65 m and a total depth of 1.3587 m. The pavement structure consisted of four layers, as presented in Table 1. The same geometric parameters were used for all simulation cases to ensure consistent comparisons among the vehicle groups.

Table 1. Pavement structural configuration and material models

Layer	Material	Thickness (m)	Material model
1	Upper asphalt layer	0.05	Viscoelastic Huet–Sayegh
2	Lower asphalt layer	0.07	Viscoelastic Huet–Sayegh
3	Graded crushed-stone base	0.4	Linear elastic
4	Subgrade	0.8387	Linear elastic

In the axisymmetric coordinate system, direction 1 corresponds to the radial direction (r), direction 2 corresponds to the vertical direction (z), and direction 3 represents the circumferential direction. Axisymmetric continuum elements were specifically formulated for this type of problem (Bi et al., 2021).

Viscoelastic model for the asphalt layers

The two asphalt layers were modeled as linear viscoelastic materials using the Huet-Sayegh model. This rheological model has been widely applied in pavement analysis to describe the time- and frequency-dependent behavior of asphalt materials and has been implemented in finite element analyses in the time domain (Chabot et al., 2010, Tai Nguyen et al., 2022). The rheological representation of the Huet-Sayegh model and its complex modulus formulation are illustrated in Figure 1 and expressed by Eq. (2), respectively.

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1+\delta(i\omega\tau(T))^{-k}+(i\omega\tau(T))^{-h}} \quad (2)$$

Where $\delta = \frac{\tau(T).(E_\infty - E_0)}{\eta_1}$, $0 < k < h < 1$ is the complex modulus, E_0, E_∞ are the limiting moduli at low and high frequencies, respectively $E^*(\omega)$ $\omega\tau \to 0$ and $\omega\tau \to \infty$.

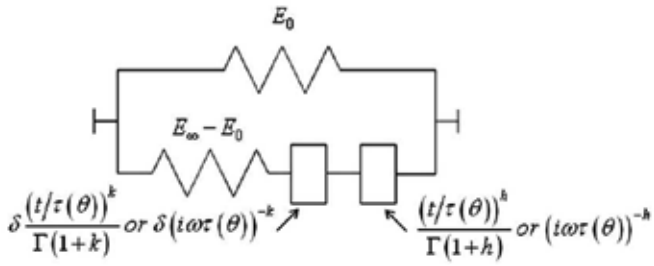


Figure 1. The rheological model of Huet-Sayegh model.

In this study, the same set of Huet-Sayegh parameters was assigned to both asphalt layers based on a previously validated model. The time-domain implementation of the Huet–Sayegh model can be found in the finite element procedure proposed by Tai Nguyen et al.(Tai Nguyen et al., 2022), in which both the Huet-Sayegh and 2S2P1D models were implemented for time-domain analysis of asphalt pavement structures. The adopted material parameters are summarized in Table 2.

Table 2. Huet-Sayegh parameters adopted for the two asphalt layers

Parameter	Value
E_0 - E_∞	150 Mpa - 37.5 GPa
ν	0.35
h	0.7984
k	0.3164
δ	5.7223
τ	0.0994
Δt	0.01

These parameters were converted consistently with the unit system adopted in the developed model. The two underlying layers, consisting of the graded crushed-stone base and the subgrade, were assumed to behave as linear elastic materials with a Young's modulus of (E=100) MPa and a Poisson's ratio of ν = 0,35. Their stress-strain relationship was assumed to follow Hooke's law, and identical elastic parameters were assigned to the base and subgrade in the present model.

Wheel-load application

The wheel load was idealized as a uniformly distributed pressure acting over a circular contact area. The radius of the loaded area was fixed at: a = 0,165 m, The loading cases corresponding to WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35 were defined based on the representative tire pressures obtained from the statistical analysis. If the representative pressure of vehicle group i is denoted by p_i the equivalent resultant load, assuming a constant circular contact radius, is given by.

$$P_i = p_i \times \pi \times a^2 \quad (3)$$

Where P_i is the equivalent load for i vehicle group, p_i is its representative contact pressure, a is the radius of the circular contact area, a = 0,165 m. All other pavement parameters, including geometry, material properties, boundary conditions, and mesh configuration, were maintained unchanged among the simulation cases.

Boundary conditions and finite element mesh

The boundary conditions were defined according to the axisymmetric formulation. Along the axis of symmetry (r = 0) and the outer radial boundary (r = 1,65 m), radial displacement was restrained (U_1 = 0), whereas the nodes along the bottom boundary were fully constrained in both the radial and vertical

directions ($U_1 = U_2 = 0$). Continuity between adjacent pavement layers was assumed to ensure stress transfer and displacement compatibility across the layer interfaces.

The finite element mesh was refined in the vicinity of the loaded area, where high stress and strain gradients were expected, and the element size was gradually increased toward the outer boundary. In the radial direction, element sizes of 0.0275 m, 0.055 m, and 0.165 m were adopted for the ranges (r=0-0.33) m, (r=0.33-0.99) m, and (r=0.99-1.65) m, respectively. In the vertical direction, each pavement layer was divided into four elements, resulting in element heights of 0.0125 m, 0.0175 m, 0.10 m, and approximately 0.2097 m for the upper asphalt layer, lower asphalt layer, graded crushed-stone base, and subgrade, respectively. The entire model consisted of 448 finite elements.

Analysis procedure

The numerical analysis was performed in the time domain to account for the viscoelastic response of the two asphalt layers. The total analysis time was set to 30, with a fixed time increment of Δt = 0,01 and a maximum of 3000 increments. These analysis parameters were kept constant for all loading cases to ensure consistent comparison among the vehicle groups. The relatively small time increment enabled the evolution of stress, strain, and displacement within the pavement structure to be captured throughout the analysis while minimizing differences associated with numerical time integration.

2.3. Evaluation of the results

The results were evaluated in two stages: statistical assessment of the surveyed tire-pressure data and analysis of the mechanical responses obtained from the simulations. For each of the five vehicle groups, WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35, the tire-pressure data were analyzed to characterize their distribution, central tendency, and variability. Statistical parameters including the mean, standard deviation, range, and frequency distribution were used to describe the tire-pressure characteristics of each group. Based on the statistical results, representative tire-pressure values were selected as input loading conditions for the finite element simulations. The mechanical responses were then evaluated in terms of displacement, stress, and strain distributions within the pavement layers. The results for the five vehicle groups were compared using the same pavement geometry, boundary conditions, material properties, and numerical settings. This approach enabled identification of the vehicle group producing the greatest stress, strain, and displacement responses and allowed the relative increase in pavement mechanical response among the loading cases to be quantified. Consequently, the relative effects of the five vehicle groups on the mechanical behavior of the flexible pavement structure were evaluated under consistent numerical conditions.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Statistical Analysis of Tire Pressure

Figure 2 presents the frequency distributions and probability density curves of tire pressure for the five vehicle groups, namely WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35. A total of 400 observations were analyzed, including 61 observations for WB-12, 79 for WB-15, 86 for WB-19, 96 for WB-20, and 78 for WB-35. The results indicate a clear rightward shift in the tire-pressure distributions from WB-12 to WB-35, reflecting an overall increase in tire pressure across the vehicle groups.

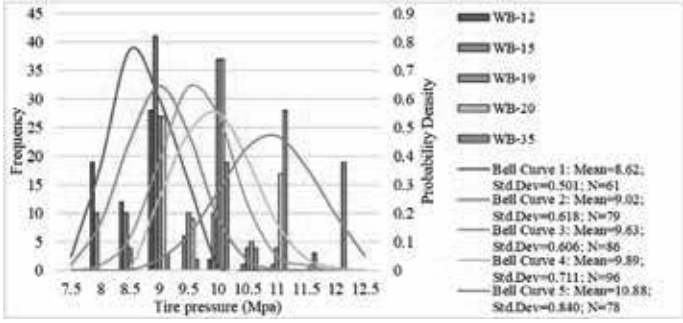


Figure 2. Frequency distributions and probability density curves of tire pressure for the five vehicle groups

The mean tire pressure of WB-12 was 8.62, with a standard deviation of 0.501, representing the lowest mean value among the five groups. WB-35 showed the highest mean tire pressure, reaching 10.88, and also exhibited the largest standard deviation of 0.840. The main statistical characteristics are summarized in Table 3.

Table 3. Descriptive statistics of tire pressure for the five vehicle groups

Vehicle group	N	Mean	Standard deviation	CV (%)
WB-12	61	8,62	0,501	5,81
WB-15	79	9,02	0,618	6,85
WB-19	86	9,63	0,606	6,29
WB-20	96	9,89	0,711	7,19
WB-35	78	10,88	0,840	7,72

In terms of the mean values, tire pressure increased progressively from WB-12 to WB-20, followed by a more pronounced increase for WB-35. Compared with WB-12, the mean tire pressures of WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35 were approximately 4.64%, 11.72%, 14.73%, and 26.22% higher, respectively. Notably, the mean tire pressure of WB-35 was approximately 10.0% higher than that of WB-20, indicating that WB-35 operated under a distinctly higher tire-pressure condition than the other groups.

3.2. Mechanical Response Analysis

3.2.1. Vertical displacement response

Figure 3 compares the vertical displacement (U2) fields of the pavement structure under the mean tire pressures associated with the five vehicle groups. A similar deflection pattern was obtained in all cases: the largest downward displacement occurred at the pavement surface beneath the center of the loaded area, followed by a gradual attenuation with both radial distance and depth.

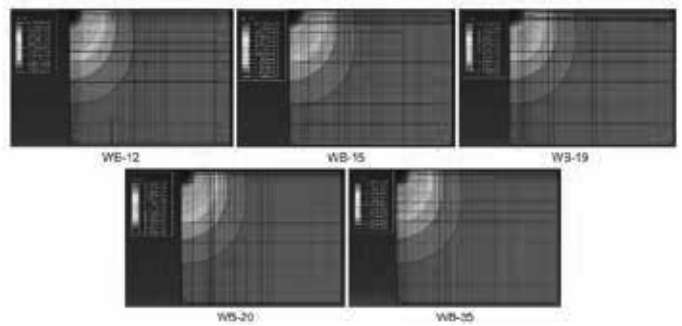


Figure 3. Vertical displacement distributions under the mean tire pressures

The minimum U2 values were -1.567×10^{-3}, -1.640×10^{-3}, -1.753×10^{-3}, -1.798×10^{-3}, and -1.978×10^{-3} m for WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35, respectively. These values correspond to maximum downward deflections of 1.567, 1.640, 1.753, 1.798, and 1.978 mm. The results therefore reveal a progressive increase in

pavement deflection with increasing mean tire pressure. Although the magnitude of the deflection varied considerably among the loading cases, the spatial extent and overall shape of the deflection basin remained broadly similar.

3.2.2. Vertical stress response

The vertical stress component S22 provides a direct indication of how the applied surface pressure is transmitted through the pavement structure. Figure 4 shows compressive stresses were concentrated beneath the loaded area and gradually dispersed into the underlying layers. The stress field expanded with depth while its magnitude decreased, reflecting the load-distribution mechanism of the multilayer pavement.

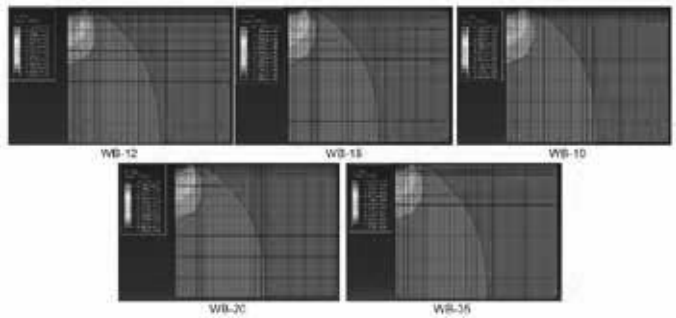


Figure 4. Vertical stress distributions under the mean tire pressures for the five groups

The maximum vertical compressive stresses were approximately 0.955 MPa for WB-12, 0.999 MPa for WB-15, 1.066 MPa for WB-19, 1.095 MPa for WB-20, and 1.205 MPa for WB-35. A particularly relevant feature of the S22 results is the progressive enlargement of the higher-compression zone as the applied pressure increased. The differences among the five cases were most pronounced close to the loading area, whereas they became less evident at greater depths and radial distances as the applied load was redistributed through the pavement layers. Thus, tire-pressure differences appear to have their strongest influence in the near-load region, while their relative effect diminishes as the stress field propagates into the deeper pavement structure.

3.2.3. Vertical strain response

The corresponding vertical strain fields are presented in Figure 5. The dominant response was compressive strain beneath the loading area, with the magnitude decreasing away from the tire-pavement contact region. Unlike the vertical stress results, which primarily illustrate load transmission, E22 reflects the resulting vertical deformation of the pavement materials and therefore provides a complementary measure of the structural response.

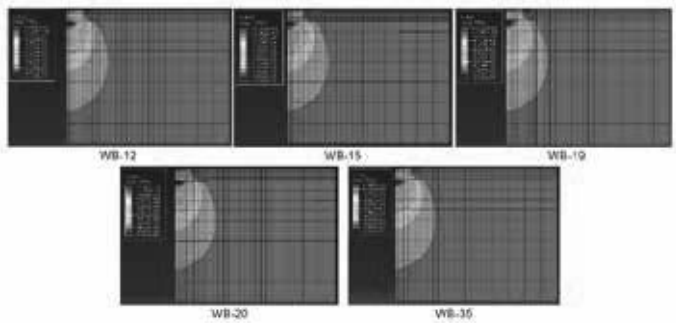


Figure 5. Vertical strain distributions under the mean tire pressures

The maximum compressive strain magnitudes were 5.158×10^{-3}, 5.397×10^{-3}, 5.762×10^{-3}, 5.918×10^{-3}, and 6.510×10^{-3} for WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35, respectively. Compared with WB-12, the corresponding increases were 4.63%, 11.71%, 14.73%, and 26.21%. The progression of E22 closely follows that observed for both U2 and S22. This consistency indicates that higher tire pressures simultaneously increase pavement deflection, vertical compressive stress, and vertical compressive strain.

3.2.4. Radial displacement response

Figure 6 presents the radial displacement component U1. In contrast to U2, which is predominantly negative because of downward pavement deflection, U1 contains both positive and negative values owing to the radial movement of the pavement material on either side of the local deformation zone. The strongest radial displacements occur in the shallow region adjacent to the loaded area, highlighting the localized lateral deformation induced by the applied contact pressure.

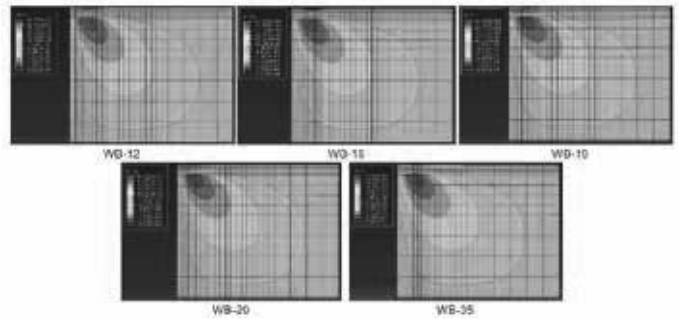


Figure 6. Radial displacement distributions under the mean tire pressures

Compared with the broader deflection field represented by U2, the U1 contours are more localized near the pavement surface and the loaded region. This distinction suggests that U1 is more sensitive to local lateral deformation, whereas U2 provides a clearer representation of the overall pavement deflection response.

Table 4. Summary of extreme mechanical responses for the five vehicle groups

Vehicle group	|UU1|max (mm)	|UU2|max (mm)	|S22|max (MPa)	|E22|max
WB-12	0,2023	1,567	0,955	$5{,}158 \times 10^{-3}$
WB-15	0,2116	1,640	0,999	$5{,}397 \times 10^{-3}$
WB-19	0,2260	1,753	1,066	$5{,}762 \times 10^{-3}$
WB-20	0,2321	1,798	1,095	$5{,}918 \times 10^{-3}$
WB-35	0,2553	1,978	1,205	$6{,}510 \times 10^{-3}$

Taken together, the four response parameters exhibit a remarkably consistent progression across the five loading cases. Relative to WB-12, the mechanical responses increased by approximately 4.6% for WB-15, 11.7-11.9% for WB-19, 14.7% for WB-20, and approximately 26.2% for WB-35. The close agreement among the relative changes in U1, U2, S22, and E22 indicates an approximately proportional increase in pavement mechanical response with increasing mean tire pressure over the investigated range. WB-35 consistently produced the largest response magnitudes, whereas WB-12 resulted in the lowest values, identifying WB-35 as the most adverse of the five investigated loading conditions.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

4.1. Conclusions

This study integrated field-surveyed tire-pressure data with finite element modeling to investigate the mechanical responses of a flexible pavement under loading conditions associated with five container-truck groups: WB-12, WB-15, WB-19, WB-20, and WB-35. Based on the statistical analysis and numerical simulations, the following main conclusions can be drawn. *First,* the surveyed tire pressures differed considerably among the five vehicle groups. The mean values increased progressively from WB-12 to WB-35,

corresponding to representative contact pressures of approximately 0.862, 0.902, 0.963, 0.989, and 1.088 MPa, respectively. WB-12 exhibited both the lowest mean pressure and the lowest relative variability, whereas WB-35 showed the highest mean value as well as the greatest dispersion. This result suggests that the use of a single nominal tire pressure for all heavy-vehicle groups may not adequately represent actual operating conditions. *Second*, despite differences in loading magnitude, the overall spatial patterns of displacement, stress, and strain remained similar among the five loading cases. The largest responses were concentrated in the vicinity of the loaded area and gradually attenuated with both radial distance and depth. Increasing tire pressure therefore primarily increased the magnitude of the pavement response rather than fundamentally changing the load-transfer mechanism within the pavement structure. *Third,* all four mechanical indicators considered in the comparative analysis exhibited a consistent increasing trend with tire pressure. The maximum vertical displacement increased from 1.567 mm for WB-12 to 1.978 mm for WB-35, while the maximum absolute radial displacement increased from 0.2023 to 0.2553 mm. Similarly, the maximum vertical compressive stress increased from approximately 0.955 to 1.205 MPa, and the maximum vertical compressive strain increased from 5.158×10^{-3} to 6.510×10^{-3}. Among the five vehicle groups, WB-35 consistently produced the largest displacement, stress, and strain responses and was therefore identified as the most adverse loading case, whereas WB-12 produced the lowest responses.

4.2. Recommendations and Future Work

The results indicate that actual tire-pressure conditions should be considered when assessing the effects of heavy container vehicles on flexible pavement structures, rather than relying exclusively on a single nominal pressure value for all vehicle groups. Particular attention should be given to vehicle groups operating at relatively high tire pressures, such as WB-35, because higher contact pressures were associated with increased pavement deflection, vertical compressive stress, and compressive strain. The present study, however, varied the mean contact pressure while maintaining a constant contact radius and identical pavement geometry, material properties, boundary conditions, and numerical settings for all loading cases. Consequently, the results primarily quantify the effects of different representative contact-pressure levels rather than the complete mechanical effects of the actual vehicle configurations. Differences in axle load, wheel load, number of tires, axle spacing, and actual tire-pavement contact geometry were not explicitly considered. Future research should therefore incorporate measured wheel or axle loads together with tire-pressure data to determine more realistic contact areas for individual vehicle groups.

Acknowledgement: This work belongs to the project grant No: T2025-232 funded by Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Vietnam.

REFERENCE

[1] Ambassa, Z., Allou, F., Petit, C. and Eko, R. M. Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM. Construction and Building Materials, no. 43, pp. 443-452, 2013.

[2] Assogba, O. C., Sun, Z., Tan, Y., Nonde, L. and Bin, Z. Finite-element simulation of instrumented asphalt pavement response under moving vehicular load. International Journal of Geomechanics, vol. 20, 04020006, 2020.

[3] Bi, J., Hanke, F., Ji, H., McLendon, R., Todd, S., Dalrymple, T., Salazar-Tio, R., Persson, M., Chiavaccini, E. and Wescott, J. Multiscale modeling for the science and engineering of materials. International Journal for Multiscale Computational Engineering, vol. 19, 2021.

[4] Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L. and Duhamel, D. Viscoroute 2.0 A: Tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design, vol. 11, pp. 227-250, 2010.

[5] Chen, H. H., Marshek, K. M. and Saraf, C. L. Effects of truck tire contact pressure distribution on the design of flexible pavements: A three-dimensional finite element approach. Transportation Research Record, 1986.

[6] Games, P. A. and Howell, J. F. Pairwise multiple comparison procedures with unequal n's and/or variances: A Monte Carlo study. Journal of Educational Statistics, vol. 1, pp. 113-125, 1976.

[7] Machemehl, R. B., Wang, F. and Prozzi, J. A. Analytical study of effects of truck tire pressure on pavements with measured tire-pavement contact stress data. Transportation Research Record, no. 1919, pp. 111-120, 2005.

[8] Park, D.-W., Martin, A. E. and Masad, E. Effects of nonuniform tire contact stresses on pavement response. Journal of Transportation Engineering, vol. 131, pp. 873-879, 2005.

[9] Tai Nguyen, H., Nguyen, D.-L., Tran, V.-T. and Nguyen, M.-L. Finite element implementation of Huet-Sayegh and 2S2P1D models for analysis of asphalt pavement structures in time domain. Road Materials and Pavement Design, vol. 23, pp. 22-46, 2022.

[10] Welch, B. L. On the comparison of several mean values: An alternative approach. Biometrika, vol. 38, pp. 330-335, 1951.

[11] Yang, S., Qi, B., Cao, Z., Zhang, S., Cheng, H. and Yang, R. Comparisons between asphalt pavement responses under vehicular loading and FWD loading. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2020, 5269652, 2020.

[12] Zhao, Y., Liu, W. and Tan, Y. Analysis of critical structure responses for flexible pavements in NCHRP 1-37A mechanistic-empirical pavement design guide. Journal of Transportation Engineering, vol. 138, pp. 983-990, 2012.

■Ngày nhận bài: 15/6/2026 ■Ngày sửa bài: 27/6/2026 ■Ngày chấp nhận đăng 06/7/2026

Mechanical behavior of cement-sand-rubber interlocking blocks with Different rubber contents and compaction energies

Ứng xử cơ học của gạch tự chèn tạo từ hỗn hợp xi măng-cát-cao su tái chế: Ảnh hưởng của hàm lượng cao su và năng lượng đầm lèn

> THANH NHAN NGUYEN, TAN LOI LUU, DUC HUNG MAC, THE VINH PHAN, DONG KIEM LAM TRAN*
Department of Civil Engineering, University of Architecture Ho Chi Minh City
*Email: lam.trandongkiem@uah.edu.vn

ABSTRACT

To address the challenges of end-of-life tires (ELTs) and natural sand depletion, this study evaluates the mechanical behavior of Cement-Sand-Rubber (CSR) composite interlocking blocks. Flat-wise compression and three-point bending tests on full-scale specimens demonstrate that optimizing mechanical compaction effectively consolidates the matrix, significantly compensating for the rubber-induced strength reduction without relying on complex chemical pretreatments. The results indicate that a 2.0% rubber content combined with the maximum compaction level (T) is optimal. Intensive compaction helps expel entrapped air and likely densifies the Interfacial Transition Zone (ITZ). Particularly, the 2.0% rubber fraction not only maintains the nominal load-bearing capacity but also shifts the failure mode from brittle to ductile, thereby significantly increasing the energy absorption capacity. In practical application, 2.15 m^2 of CSR pavement completely consumes one standard automobile tire and substantially reduces natural sand extraction. This research demonstrates the promising potential of CSR materials in advancing green infrastructure and the circular economy model.

Keywords: Interlocking blocks, End-of-life tires (ELTs); Compaction energy; Mechanical behavior, Interfacial Transition Zone (ITZ); Sustainable construction materials.

TÓM TẮT

Nhằm giải quyết vấn đề lốp xe phế thải (ELTs) và sự cạn kiệt nguồn cát tự nhiên, nghiên cứu này đánh giá ứng xử cơ học của gạch tự chèn composite xi măng-cát-cao su (CSR). Thí nghiệm nén mặt và uốn ba điểm trên các mẫu kích thước thực cho thấy việc tối ưu hóa đầm lèn cơ học có thể cải thiện đáng kể độ đặc chắc của vật liệu, qua đó bù đắp sự suy giảm cường độ do bổ sung cao su mà không cần các phương pháp tiền xử lý hóa học phức tạp. Kết quả xác định hàm lượng cao su 2,0% kết hợp với mức đầm lèn tối đa (T) là tổ hợp tối ưu. Đầm lèn cường độ cao giúp giảm đáng kể lỗ rỗng khí và cải thiện vùng chuyển tiếp giao diện (ITZ). Đặc biệt, hàm lượng cao su 2,0% vừa duy trì khả năng chịu tải theo yêu cầu, vừa làm thay đổi cơ chế phá hoại theo hướng dẻo hơn, qua đó nâng cao đáng kể khả năng hấp thụ năng lượng. Trong ứng dụng thực tế, 2,15 m^2 mặt đường lát gạch CSR có thể tái sử dụng lượng cao su tương đương một lốp xe ô tô tiêu chuẩn, đồng thời giảm nhu cầu khai thác cát tự nhiên. Kết quả nghiên cứu cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu CSR trong phát triển cơ sở hạ tầng xanh và thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn.

Từ khóa: Gạch tự chèn; lốp xe phế thải (ELTs); năng lượng đầm lèn; ứng xử cơ học; vùng chuyển tiếp giao diện (ITZ); vật liệu xây dựng bền vững.

1. INTRODUCTION

The explosive growth of the global transportation sector has precipitated an exponential increase in end-of-life tires (ELTs), with over 1.5 billion tires discarded annually [1], and an estimated stockpile projected to reach 5 billion units by 2030 [2]. This burden is further exacerbated by the complex vulcanized structure, which renders ELTs virtually non-biodegradable, rapidly overloading landfills and threatening ecosystems [3]. In Vietnam, the ELT crisis is becoming increasingly acute as the generation rate far exceeds the management capacity; the majority of this waste is still subjected to rudimentary disposal via unregulated landfilling or spontaneous open burning, resulting in severe environmental pollution [4]. This escalating trend is clearly visualized through the correlation chart in Fig. 1. An analysis of statistical data from the 2016-2022 period

further elucidates this alarming positive correlation: the growth of the transport economy caused the number of circulating automobiles to surge by 96.0% (from 2.52 to 4.94 million vehicles), consequently triggering a corresponding 96.3% substantial increase in the mass of end-of-life tires (from 273.88 to a peak of 537.50 thousand tons/year), with a compound annual growth rate of 12.4%. This mass estimation was derived from a weighted vehicle-classification model that integrates the market share, tire-per-vehicle ratio, average unit mass (9-80 kg), and periodic replacement cycle (2-4 years) across three primary categories: passenger cars, light commercial vehicles, and heavy-duty trucks. This significant increase, surpassing the carrying capacity of the collection infrastructure, has posed an urgent need to implement novel intervention technologies; among these, the direct reuse of waste rubber material as an aggregate to investigate Cement-Sand-Rubber (CSR) composite mixtures, and its subsequent application in manufacturing CSR interlocking blocks, serves as a strategic infrastructure solution aimed at alleviating ecological pressure and advancing toward a circular economy model [5].

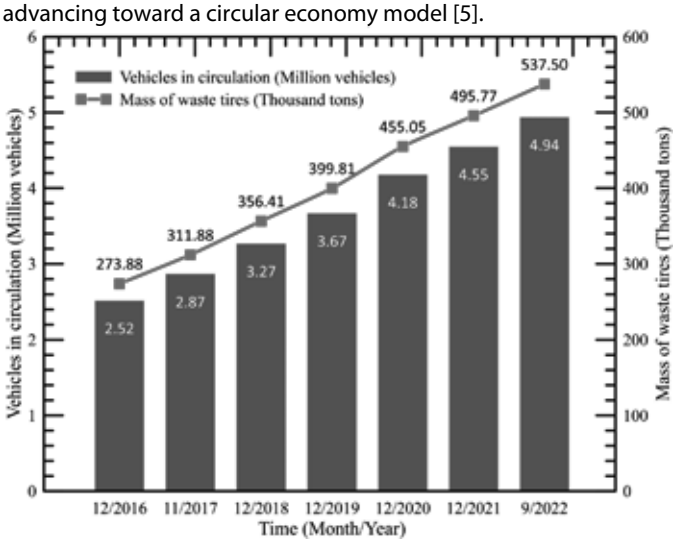


Figure 1. Correlation between vehicles in circulation and waste tires from 2016 to 2022

Source: Statistics on vehicles in circulation from the Vietnam Register (2016 - 2022) [6]*; methodology and conversion coefficients for waste tires proposed by the authors.*

Rapid urbanization has transformed sand into the second most heavily exploited resource globally, inducing hydrodynamic imbalances and severe bank erosion [7]. In Vietnam, the severe shortage of construction sand-with the current supply meeting only 40.0-50.0% of demand is directly causing riverbed degradation and seawater intrusion [8]. Under this pressure, the application of recycled aggregates following the circular economy model constitutes an urgent solution to conserve resources and mitigate the carbon footprint [9]. Based on the demonstrated superior technical characteristics of the CSR composite material [10], this study fabricates and evaluates the mechanical behavior of non-structural interlocking blocks. While substituting 1.0-2.0% of natural sand by weight nominally conserves resources, the fundamental engineering contribution of the incorporated rubber lies in transforming the brittle cementitious matrix. By significantly improving ductility, strain energy absorption capacity, and reducing structural self-weight, this approach reconciles the conflict between infrastructure development and ecological conservation, establishing a closed-loop system that transforms hazardous waste into high-value secondary resources.

2. LITERATURE REVIEW

The CSR composite material system has attracted particular attention due to its ability to combine a rigid, brittle cementitious matrix with an elastic rubber phase, thereby enhancing energy absorption capacity [11]. Although the hydrophobic nature of rubber weakens the interfacial transition zone (ITZ) and reduces compressive strength [12], CSR possesses superior mechanical and physical advantages, such as transitioning the failure behavior from brittle to ductile [13], along with lightweight, thermal insulation, and crack-resistant properties ideal for urban infrastructure [14]. This mechanical-physical trade-off has driven an extensive wave of research globally. Through an analysis of 100 representative studies (1990-2024), the research landscape is systematized into five core thematic areas (Fig. 2). Among these, investigations into static mechanical properties constitute the overwhelming majority at (35%), followed by long-term durability assessments and life cycle assessment (LCA) at (25%). Deciphering the micromechanisms is focused on the domains of dynamic and damping properties (15%), and ITZ microstructure (15%). Notably, research directions addressing practical applications on specific structural elements currently account for a very modest proportion (10%). This deficiency underscores an urgent need to expand experimental testing on full-scale, non-structural products, particularly to demonstrate the feasibility of manufacturing CSR interlocking blocks utilizing locally available materials in Vietnam.

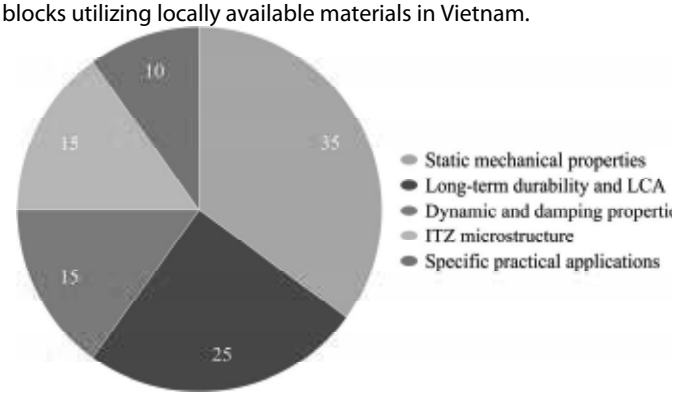


Figure 2. Proportional distribution of scientific publications by research topics

To optimize the mechanical properties of interlocking blocks, this study builds upon foundational precedents: Luu et al. (2026) identified 2.0% rubber aggregate as the optimal threshold to mitigate cracking induced by elastic rebound stress; Mac et al. (2026) affirmed that a 15.0% cement dosage is the optimal binder content to stabilize hydration kinetics and establish a 'physical interlocking' mechanism at the interfacial transition zone (ITZ). On this basis, the current research focuses on evaluating mechanical behavior (compressive strength and three-point bending) by optimizing compaction energy to compensate for the reduction in mechanical performance without utilizing chemical pretreatments [15]. The experimental objective is to establish a balance between stable load-bearing capacity and the superior ductility and energy absorption characteristics of the elastic aggregate under realistic loading conditions [16].

3. MATERIALS AND EXPERIMENTAL METHODS

3.1. Materials

The material system for manufacturing CSR composite interlocking blocks is illustrated in Fig. 3, comprising: compliant PCB40 blended Portland cement (Vicem Ha Tien); clean sand (0.15 - 2.00 mm) as the fine aggregate to create a dense matrix; and rubber crumbs (1.00 - 3.00 mm)

recovered from end-of-life tires via mechanical grinding. To maximize environmental friendliness, the rubber crumbs undergo no chemical pretreatment, utilizing their natural surface roughness to create a 'physical interlocking' mechanism with the cement matrix, thereby enhancing intrinsic crack resistance. The mixture contains no coarse aggregate, is mixed with water according to the design ratio, and is cast in geometrically symmetrical zigzag plastic molds (22.50 × 11.25 × 6.00 cm, with a base area of 253.13 cm^2). The casting process applies a layered mechanical compaction technique to eliminate air voids, ensuring the specimens achieve uniform target density and compactness.

(a) Cement *(b) Fine sand* *(c) Rubber crumbs* *(d) Fresh water* *(e) Interlocking block mold*

Figure 3. Characteristics of raw materials used in the experimental research

3.2. Mixture Proportions and Specimen Preparation

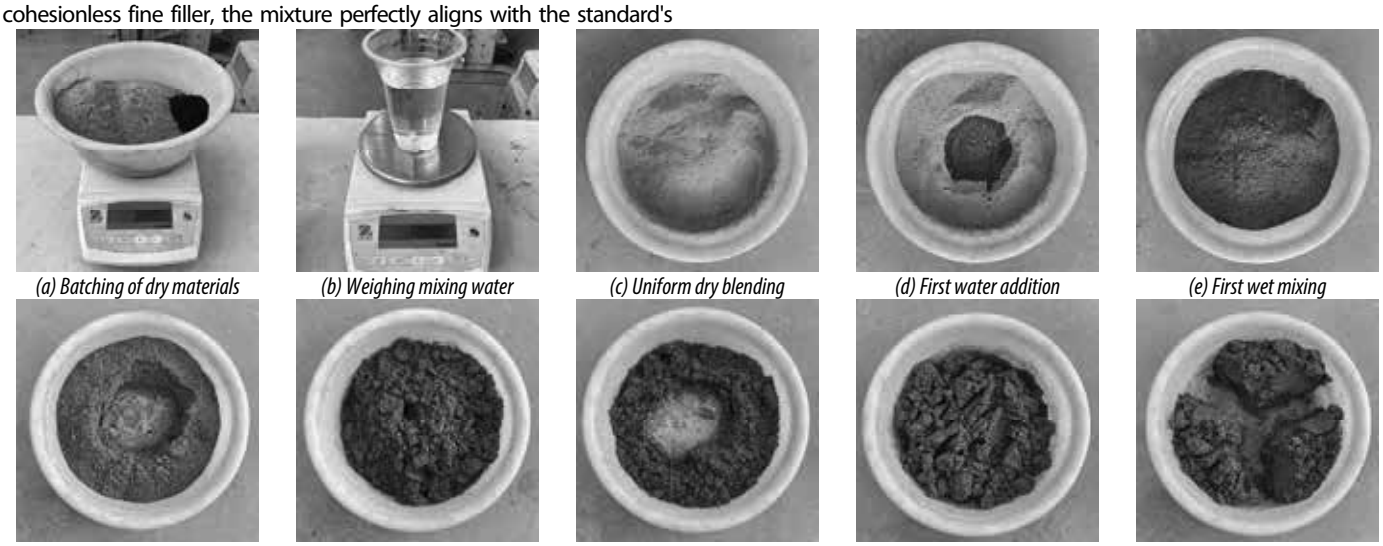
3.2.1. Mixture Proportions

This study investigates three mix proportions CSR00, CSR01, and CSR02 corresponding to the replacement rates of sand with rubber crumbs at 0%, 1%, and 2% by total dry weight of the mixture, respectively. To ensure uniformity, all components are standardized based on 1000 g of dry mixture, maintaining a fixed cement content of 15% and a water-to-cement (W/C) ratio of 1.00. This elevated W/C ratio strategically ensures workability without chemical superplasticizers, allowing the cement paste to uniformly coat the hydrophobic rubber and prevent segregation during manual casting. The specimen geometry is quantified based on standard mold dimensions, allowing for precise control of the actual volume of each interlocking block during the fabrication process.

The JISA 1224:2020 [17] standard, originally designed for cohesionless soils, was adapted to evaluate the compaction limits of the optimized CSR mixture (containing 2.0% rubber and 15% cement). Because the evaluation was conducted on the completely dry and unhydrated blend, where the cement powder acts purely as a cohesionless fine filler, the mixture perfectly aligns with the standard's scope. The results indicated that the dry unit weight fluctuates from 14.62 to 19.33 kN/m^3. On this basis, the study established three target dry unit weight thresholds for the final mixture: 17.00, 18.00, and 19.00 kN/m^3, achieved through three levels of layered compaction: 1 layer (Simple - S), 2 layers (Double - D), and a maximum of 3 layers (Triple - T). The synchronized control of these parameters ensures consistency across the material system, providing a reliable experimental foundation for evaluating the mechanical behavior of full-scale structural components.

3.2.2. Preparation of Specimens

Due to the lightweight and hydrophobic nature of rubber crumbs, which are prone to segregation and agglomeration, a strict material preparation protocol was implemented. First, components were precisely batched to 0.01g accuracy (Fig. 4 (a), (b)). Subsequently, continuous dry mixing was performed to eliminate agglomerates. This mechanical friction forced fine cement particles to uniformly coat the porous rubber surfaces (Fig. 4(c)), optimizing elastic phase dispersion and ensuring specimen integrity.

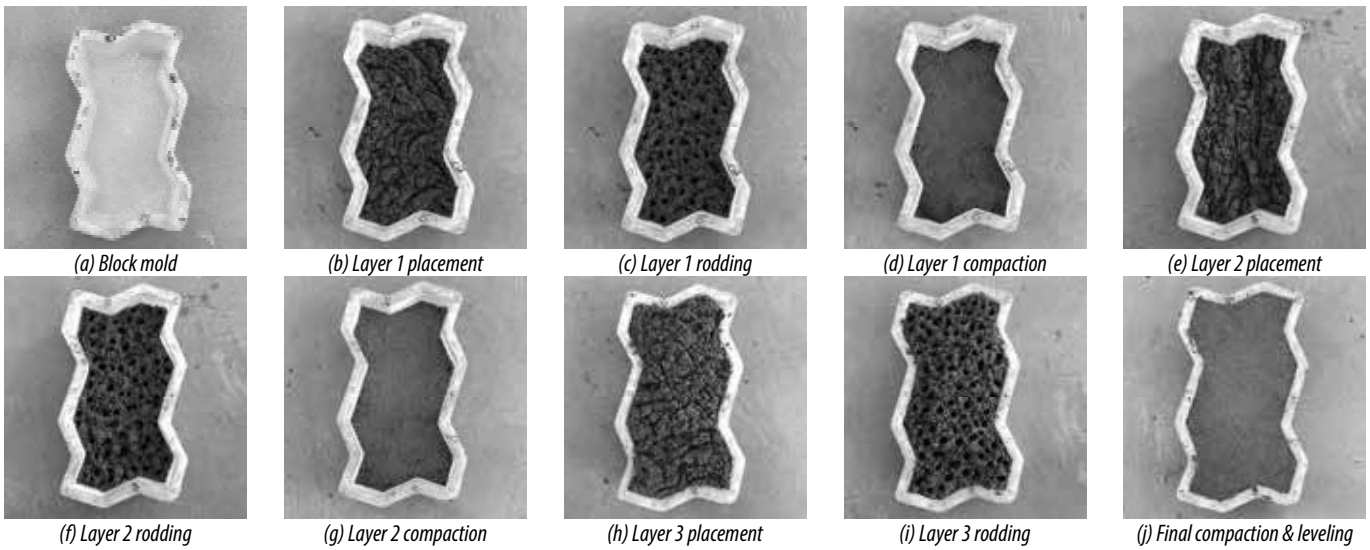


(a) Batching of dry materials *(b) Weighing mixing water* *(c) Uniform dry blending* *(d) First water addition* *(e) First wet mixing*

(f) Second water addition *(g) Second wet mixing* *(h) Third water addition* *(i) Third wet mixing* *(j) Mixture proportioning*

Figure 4. Material batching and wet mixing process of block specimens

Following dry mixing, water was added in three increments under continuous agitation to achieve a homogeneous consistency and prevent rubber segregation (Fig. 4(d) - (j)). The mixture was precisely layered into plastic molds to reach the target dry unit weights (17.00, 18.00 and 19.00 kN/m^3). Each layer underwent dual compaction: 25 tamps with a Ø12 mm steel rod to expel air voids, followed by 25 strokes with a (3.00 × 3.00 × 30.00 cm) wooden tamper to fill the mold corners. The top surface was then struck off flat and screeded to ensure a uniform specimen height of 6.00 cm (Fig. 5). After 72 hours of casting, the blocks were demolded and air-cured in a controlled laboratory environment for 28 days. The curing area was well-ventilated and shielded from direct sunlight and external moisture to ensure complete cement hydration and material consistency for subsequent mechanical testing.



(a) Block mold (b) Layer 1 placement (c) Layer 1 rodding (d) Layer 1 compaction (e) Layer 2 placement

(f) Layer 2 rodding (g) Layer 2 compaction (h) Layer 3 placement (i) Layer 3 rodding (j) Final compaction & leveling

Figure 5. Casting and layered compaction procedure for interlocking block specimens

3.3. Experimental Methods

The flat-wise compression test of the interlocking blocks was conducted using a TYA-300 hydraulic compression testing machine as a modified method based on Vietnamese Standard TCVN 6476:1999 [18]. To ensure uniform load distribution across the entire block and eliminate localized stress concentration caused by surface imperfections, each specimen was sandwiched between two flat aluminum plates fully covering both the top and bottom surfaces. The loading rate was maintained constant until complete failure of the material occurred. The ultimate failure load was determined by accumulating the compressive force recorded by the testing machine and the equivalent load converted from the mass of the upper aluminum plate, thereby providing highly accurate data for computing the compressive strength.

A three-point bending test evaluated the specimens' flexural resistance against subgrade settlement stresses. The interlocking block was placed horizontally on two parallel steel supports with an 18.50 cm span, and load was applied through a mid-span steel bar (Ø12 mm) to ensure linear distribution and minimize surface error. Loading continued continuously until failure to record the ultimate load. This data was used to calculate flexural strength and analyze the effectiveness of crumb rubber in improving material ductility.

(a) TYA-300 hydraulic testing machine (b) Specimen before loading (c) Compressive failure mode (d) Bending span schematic (e) Flexural failure mode

Figure 6. Mechanical testing configurations and typical failure modes of the interlocking blocks

To mitigate random errors, 12 specimens (06 for compression and 06 for bending tests) were fabricated for each experimental condition. The raw data were screened in accordance with TCVN 3118:2022 [19], to eliminate outliers (values deviating by more than ±15% from the mean). From the valid specimens, three with the smallest errors were selected to form a standard sample set. The arithmetic mean of this three-specimen set was taken as the representative mechanical result for each mix design, thereby ensuring the reliability of the experimental data.

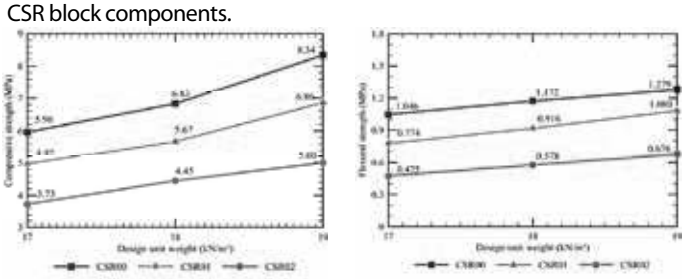
4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Results

The compression test results presented in Fig. 7(a) indicate that the actual dry unit weight is lower than the design threshold due to the 'stress relaxation' (or elastic rebound) mechanism of the rubber particles, which generates intrinsic voids. Despite this deficit, the compressive strength still exhibited a direct correlation with compaction energy across the phases: transitioning from (S) to (D) recorded an improvement level CSR00 (+14.6%), CSR01 (+14.1%), CSR02 (+19.3%); while transitioning from (D) to (T) achieved CSR00 (+22.1%), CSR01 (+21.0%), CSR02 (+12.4%); the overall transition from (S) to (T) reached an impressive improvement level: CSR00 (+39.9%), CSR01 (+38.0%), CSR02 (+34.0%). In essence, higher compaction energy consolidates the matrix, eliminates macro-voids, and tightens the interfacial transition zone (ITZ), confirming that this is the pivotal solution for restoring the compressive resistance of CSR blocks.

The flexural behavior also exhibited a direct correlation with compaction energy (Fig. 7(b)), with a particularly outstanding efficiency observed in rubber-containing mixtures. Specifically, transitioning from the (S) level to the (D) level achieved an improvement in CSR00 (+12.0%), CSR01 (+18.3%), CSR02 (+21.7%); from (D) to (T) achieved CSR00 (+9.1%), CSR01 (+17.9%), CSR02 (+17.0%); the entire transition from (S) to (T) recorded a significant improvement: CSR00 (+22.3%), CSR01 (+39.5%), CSR02 (+42.3%). Notably, mixtures with high rubber content (CSR02) exhibited a particular sensitivity to compaction effort, indicating that increasing compaction energy effectively fills the microstructural defects induced by the rubber. The mechanisms of

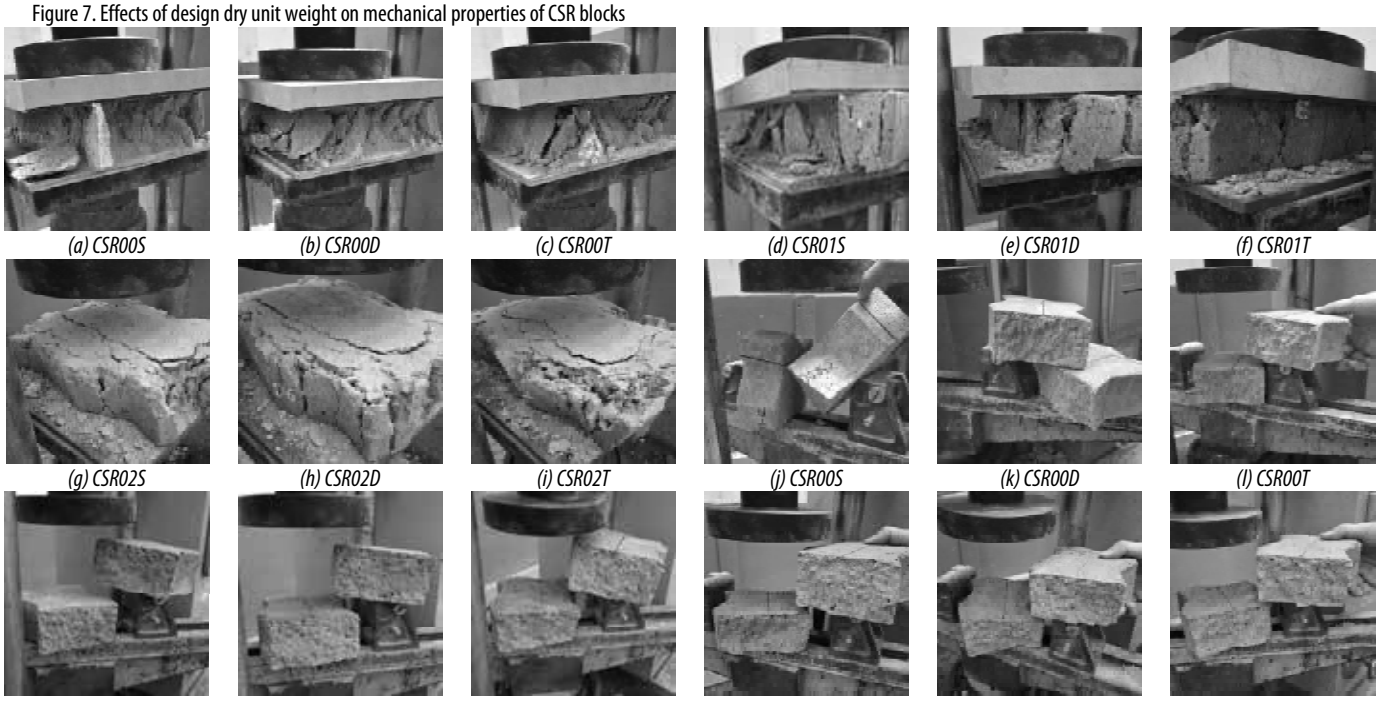
structural consolidation and stress concentration mitigation at the ITZ not only overcome mechanical property deficiencies but also reinforce intrinsic bonding, significantly optimizing the flexural capacity of the CSR block components.



(a) Compressive strength *(b) Flexural strength*

Figure 7. Effects of design dry unit weight on mechanical properties of CSR blocks

Failure modes (Fig. 8) directly reflect the internal microstructural alterations. Low compaction (S) yields a highly porous matrix causing random crack propagation, whereas maximum compaction (T) creates a dense, well-consolidated cementitious matrix. Under compression (Fig. 8(a)-(i)), combining compaction level (T) with 2.0% rubber maximizes strain energy absorption. This transitions the mechanical behavior from brittle spalling (CSR00) to a ductile mode with lateral bulging (CSR02). Under flexural loading (Fig. 8(j)-(r)), this brittle-to-ductile transition prevents sudden fragmentation; the dispersed rubber network ensures stable, controlled fracturing. Consequently, CSR02 maintains structural integrity under peak loads, providing the essential toughness for block pavements to withstand complex field impacts.



(a) CSR00S *(b) CSR00D* *(c) CSR00T* *(d) CSR01S* *(e) CSR01D* *(f) CSR01T*

(g) CSR02S *(h) CSR02D* *(i) CSR02T* *(j) CSR00S* *(k) CSR00D* *(l) CSR00T*

(m) CSR01S *(n) CSR01D* *(o) CSR01T* *(p) CSR02S* *(q) CSR02D* *(r) CSR02T*

Figure 8. Failure modes of CSR blocks: Compression (a-i) and bending (j-r) tests

4.2. Discussion

The experimental results on the block specimens have provided a solid quantitative basis for addressing the technological limitations in the manufacturing of CSR materials. First, standardizing the compaction energy to reach the designed unit weight thresholds (17.00, 18.00 up to 19.00 kN/m^3) maximized the expulsion of air voids, comprehensively resolving the porosity and air-entrapment drawbacks typical of mixtures containing elastic particles [12]. Second, the mechanical interlocking effect generated by the dense compaction of the interfacial transition zone (ITZ) enhanced internal adhesion without relying on complex surface pretreatment chemicals [15], thus optimizing the production process and enhancing ecological sustainability. Finally, combining high compaction energy (T) with a low dosage (2.0%) of rubber aggregate successfully transitioned the fracture behavior from brittle to ductile. Although the experimental compressive strength of 5.00 MPa falls below the 20 MPa requirement for heavy-duty paving blocks under TCVN 6476:1999 [18], the product is explicitly positioned as an eco-friendly interlocking block dedicated to light-load landscape areas. Furthermore, satisfying the M3.5 grade threshold under TCVN 6477:2016 [20] demonstrates that the CSR composite matrix inherently possesses adequate static load-bearing capacity for non-structural elements. This trade-off of static strength for ductile deformation optimally positions CSR materials for low-load applications requiring high damping capacity, such as internal pedestrian walkways, residential courtyards, or garden pathways, mitigating the severe mechanical degradation typically observed at high replacement ratios [21, 22], and demonstrating the superiority of the material system under practical loading conditions.

Beyond its physico-mechanical properties, the CSR02 interlocking block offers dual environmental and resource benefits. With a practical construction norm of 39.50 blocks/m^2 (equivalent to 104.28 kg/m^2), incorporating 2.0% elastic particles directly reduces sand consumption by 2.09 kg/m^2, thereby alleviating the dependence on natural sand resources. Regarding waste management, it is estimated that constructing 2.15 m^2 of pavement fully consumes the usable rubber (4.50 kg) recovered from a standard scrap car tire (total mass of 9.00 kg, 50% recovery rate). These quantitative results strongly affirm the feasibility of CSR materials in realizing the circular economy model and advancing the development of eco-friendly green infrastructure.

5. CONCLUSION

The study has accomplished the objective of experimentally evaluating the mechanical behavior of full-scale CSR composite interlocking block specimens. Based on the acquired quantitative data, several significant conclusions are drawn as follows:

First, the study affirms that maximizing compaction energy is the key technology to overcome the mechanical drawbacks of rubberized materials. Specifically, applying the maximum compaction effort (T) targeting the design unit weight of 19.00 kN/m^3 proves to be the optimal approach. Although the actual experimental unit weight falls slightly short of this target due to the inherent elastic rebound of rubber particles, this intensive compaction effort maximizes the expulsion of excess air voids, tightly consolidating the pore spaces and the interfacial transition zone (ITZ). This "physical interlocking" mechanism allows the fabrication of CSR blocks that meet load-bearing standards without relying on costly chemical surface pretreatment methods (such as NaOH or Silane), ensuring the environmentally friendly material approach.

Second, the CSR02 mix proportion (containing 2.0% rubber granules and 15.0% cement) is the optimal threshold for non-structural components. With an experimental compressive strength reaching 5.00 MPa, the material exceeds the M3.5 grade standard according to TCVN 6477:2016, This explicitly positions the CSR block as an eco-friendly paving solution dedicated strictly to light-load applications, such as pedestrian walkways, residential courtyards, and garden pathways. This application successfully transitions the failure mode from brittle to ductile. Thanks to the lateral expansion and energy absorption capacity of the rubber granules, the specimens can maintain their structural integrity, resist sudden fragmentation, and enhance the service life of structures against impacts and differential settlement in practical conditions.

Finally, the successful application of 100% locally available materials (low-grade fine sand, PCB40 cement, and waste rubber) affirms the high feasibility of this technology in Vietnam. Environmentally, every 2.15 m^2 of sidewalk paved with CSR02 blocks will fully consume the rubber from one scrap car tire, while simultaneously saving 2.09 kg of natural sand per m^2. These results demonstrate that CSR interlocking blocks represent a potential green infrastructure solution, promoting the circular economy and sustainable resource conservation.

To expand upon these findings, future studies should explore the incorporation of high-range water-reducing admixtures to optimize the W/C ratio. Additionally, assessing the long-term durability of CSR materials under hot and humid climates, particularly regarding water absorption and surface abrasion resistance in accordance with TCVN 6476:1999, is highly recommended to ensure comprehensive practical viability.

REFERENCES

[1] W. A. Laftah and W. A. Wan Abdul Rahman. A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. Mater. Adv., vol. 6, no. 15, pp. 4992-5010, 2025, doi: 10.1039/D5MA00463B.

[2] B. S. Thomas and R. C. Gupta. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 54, pp. 1323-1333, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.092.

[3] M. Sienkiewicz, H. Janik, K. Borzędowska-Labuda and J. Kucińska-Lipka. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. J. Clean. Prod., vol. 147, pp. 560-571, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.121.

[4] A. T. Hoang, T. H. Nguyen and H. P. Nguyen. Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: a review. Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff., vol. 46, no. 1, pp. 6305-6322, Dec. 2024, doi: 10.1080/15567036.2020.1745336.

[5] T. V. Trần, T. H. Phan, A. T. T. Lê and T. M. Trần. Evaluation of Factors Affecting the Transition to a Circular Economy (CE) in Vietnam by Structural Equation Modeling (SEM). Sustainability, vol. 14, no. 2, p. 613, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020613.

[6] Cục Đăng kiểm Việt Nam. Tổng hợp số liệu phương tiện giao thông trong cả nước. Cổng thông tin điện tử Cục Đăng kiểm Việt Nam. Internet: https://www.vr.org.vn/thong-ke/Pages/tong-hop-so-lieu-phuong-tien-giao-thong-trong-ca-nuoc.aspx (truy cập: tháng 4/2026).

[7] S. Kothapalli. Future of Concrete: Navigating Sand Scarcity. Int. J. Adv. Dev. Res. IJAIDR, vol. 16, no. 1, p. 10, 2025, doi: 10.71097/IJAIDR.v16.i1.1434.

[8] D. D. Tran, N. D. Thien, K. W. Yuen, R. Y. S. Lau, J. Wang and E. Park. Uncovering the lack of awareness of sand mining impacts on riverbank erosion among Mekong Delta residents: insights from a comprehensive survey. Sci. Rep., vol. 13, no. 1, p. 15937, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43114-w.

[9] L. H. Anh et al. Life Cycle Assessment of River Sand and Aggregates Alternatives in Concrete. Materials, vol. 16, no. 5, p. 2064, Mar. 2023, doi: 10.3390/ma16052064.

[10] S. M. A. Qaidi, Y. Z. Dinkha, J. H. Haido, M. H. Ali and B. A. Tayeh. Engineering properties of sustainable green concrete incorporating eco-friendly aggregate of crumb rubber: A review. J. Clean. Prod., vol. 324, p. 129251, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129251.

[11] N. I. Fattuhi and L. A. Clark. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. Constr. Build. Mater., vol. 10, no. 4, pp. 229-236, Jun. 1996, doi: 10.1016/0950-0618(96)00004-9.

[12] M. Turki, E. Bretagne, M. J. Rouis and M. Quéneudec. Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures. Constr. Build. Mater., vol. 23, no. 7, pp. 2715-2722, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.019.

[13] J. Xue and M. Shinozuka. Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability. Constr. Build. Mater., vol. 42, pp. 196-204, May 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005.

[14] L. Liu, G. Cai, J. Zhang, X. Liu, and K. Liu. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review. Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 126, p. 109831, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109831.

[15] Y. Li, X. Zhang, R. Wang and Y. Lei. Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: A review. Constr. Build. Mater., vol. 227, p. 116691, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116691.

[16] R. Siddique and T. R. Naik. Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview. Waste Manag., vol. 24, no. 6, pp. 563-569, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.wasman.2004.01.006.

[17] Japanese Standards Association. JISA1224:2020: 砂の最小密度・最大密度試験方法. Japanese Standards Association (JSA), JISA 1224:2020, 2020.

[18] Bộ Khoa học, Công nghệ và Môi trường. TCVN 6476:1999: Gạch bê tông tự chèn, 1999.

[19] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3118:2022: Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén, 2022.

[20] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6477:2016: Gạch bê tông; Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6477:2016, 2016.

[21] Z. K. Khatib and F. M. Bayomy. Rubberized Portland Cement Concrete. J. Mater. Civ. Eng., vol. 11, no. 3, pp. 206-213, Aug. 1999, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:3(206).

[22] F. Aslani. Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete. J. Mater. Civ. Eng., vol. 28, no. 3, Mar. 2016, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001429.

■Ngày nhận bài: 02/7/2026 ■Ngày sửa bài: 17/7/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2026

A five-pillar readiness framework for public-private partnerships in education infrastructure: Evidence from Laos

Khung đánh giá sự sẵn sàng cho đầu tư theo phương thức đối tác công tư trong hạ tầng giáo dục: Trường hợp nghiên cứu tại Lào

> BOUNYONG SICHANTHALA, NGUYEN ANH DUC*, TRAN VAN TAN
Hanoi University of Civil Engineering, Hanoi, Vietnam
*Corresponding author, Email: ducna@huce.edu.vn

ABSTRACT

Public-private partnership (PPP) is widely promoted to close infrastructure funding gaps, yet education infrastructure in developing countries - and the question of whether a country is ready to deliver it through PPP - remains under-examined. Existing readiness and critical-success-factor frameworks were developed largely for economic infrastructure in mature markets and rarely address education in a least-developed, transition-economy setting. This paper develops a five-pillar readiness framework tailored to education-sector PPP and subjects it to an initial empirical examination using survey data from the National University of Laos (n = 139 across five stakeholder groups). The framework comprises legal-institutional, financial-market, institutional-capacity, social-acceptance and land-planning pillars; treating social acceptance and land as standalone pillars is its principal theoretical departure. Exploratory factor analysis (KMO = 0.751; 72.8% of variance explained) recovered the hypothesised five-factor structure with loadings between 0.721 and 0.895. Relative-importance analysis revealed an "inverted readiness" pattern: social acceptance and institutional capacity scored highest, whereas the institutional-market pillars - particularly finance - were the binding constraints. The findings reframe the debate over PPP appropriateness in developing-country education and offer a transferable diagnostic instrument. Confirmatory validation on larger, multi-country samples is identified as the next step.

Keywords: Public-private partnership; education infrastructure; readiness assessment; exploratory factor analysis; national University of Laos.

TÓM TẮT

Đầu tư theo phương thức đối tác công tư (PPP) được khuyến khích rộng rãi nhằm thu hẹp khoảng trống về vốn cho hạ tầng, song hạ tầng giáo dục ở các nước đang phát triển - cùng câu hỏi liệu một quốc gia đã sẵn sàng triển khai hạ tầng đó qua PPP hay chưa ?, vẫn còn ít được nghiên cứu. Các khung đánh giá sự sẵn sàng và khung yếu tố thành công hiện có phần lớn được xây dựng cho hạ tầng kinh tế ở các thị trường phát triển và hiếm khi đề cập đến giáo dục trong bối cảnh một nền kinh tế chuyển đổi, kém phát triển. Bài báo này xây dựng một khung đánh giá sự sẵn sàng gồm năm trụ cột được thiết kế riêng cho PPP trong lĩnh vực giáo dục và tiến hành kiểm chứng thực nghiệm bước đầu bằng dữ liệu khảo sát tại Đại học Quốc gia Lào (n = 139, thuộc năm nhóm bên liên quan). Khung gồm các trụ cột: pháp lý - thể chế, tài chính - thị trường, năng lực cơ sở, chấp nhận xã hội và đất đai - quy hoạch; trong đó việc tách chấp nhận xã hội và đất đai thành các trụ cột độc lập là điểm khác biệt lý luận chủ yếu của nghiên cứu. Phân tích nhân tố khám phá (KMO = 0,751; tổng phương sai trích 72,8%) đã tái lập cấu trúc năm nhân tố như giả thuyết, với hệ số tải dao động từ 0,721 đến 0,895. Phân tích mức độ quan trọng tương đối cho thấy một mô thức "sẵn sàng phân tầng ngược": chấp nhận xã hội và năng lực cơ sở đạt điểm cao nhất, trong khi các trụ cột thể chế - thị trường - đặc biệt là tài chính - lại là những nút thắt ràng buộc. Các phát hiện này định hình lại cuộc thảo luận về tính phù hợp của PPP trong giáo dục ở các nước

đang phát triển và cung cấp một công cụ chẩn đoán có thể chuyển giao. Việc kiểm định khẳng định trên các mẫu lớn hơn, đa quốc gia được xác định là bước nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: Đối tác công tư; hạ tầng giáo dục; đánh giá sự sẵn sàng; phân tích nhân tố khám phá; Đại học Quốc gia Lào.

1. INTRODUCTION

Developing countries face a persistent gap between the infrastructure their development strategies require and the public resources available to finance it. Education infrastructure is a particularly neglected corner of this gap: because schools, laboratories and student housing generate weak or no direct revenue, they attract far less private capital than energy or transport assets, even though they underpin long-run human-capital formation. Public–private partnership (PPP) - a long-term contractual arrangement in which a private party finances, builds and operates a public asset against payments linked to availability or usage - is routinely advanced as a way to mobilise additional resources. Yet its application to education infrastructure in the least-developed world remains thin, and the prior question of whether a given country and institution are actually ready to deliver education through PPP is seldom answered with evidence.

Laos illustrates the problem sharply. The country combines pressing needs to expand and modernise its higher-education infrastructure with an unusually constrained fiscal position: high public debt and shrinking budgetary space limit the capacity of the state to finance and maintain university facilities from public funds alone. PPP is therefore an attractive option in principle. In practice, however, education infrastructure - and specifically the facilities of the National University of Laos (NUL), the country's flagship institution - has been almost entirely absent from Lao PPP practice, which has concentrated on revenue-rich economic infrastructure such as hydropower and transport.

The scholarly literature offers only partial guidance. A large body of work on the enabling environment and critical success factors (CSFs) of PPP has identified the institutional, financial and contractual conditions under which partnerships succeed [1, 2, 3, 4]. But three limitations recur. First, these frameworks were developed predominantly for economic infrastructure in mature or middle-income markets, and their factor structures may not transfer to a least-developed, transition-economy context. Second, the literature tends to conflate the appropriateness of PPP (whether it is a suitable mechanism) with readiness (whether the enabling conditions are in place), even though a project can be appropriate yet unready. Third, education - a publicly sensitive service with weak cost-recovery and distinctive land and social dynamics - is rarely the object of readiness assessment.

This paper addresses those gaps by (i) developing a five-pillar readiness framework tailored to education-sector PPP, in which social acceptance and land are elevated to standalone pillars; (ii) subjecting the framework to an initial empirical examination through a stakeholder survey at NUL analysed by exploratory factor analysis (EFA) and relative-importance indexing; and (iii) documenting an "inverted readiness" pattern in which social and capacity conditions are relatively strong while institutional-market conditions bind. The study is deliberately scoped to a single research question - "is education-sector PPP appropriate for Laos and NUL, and how ready is the setting?" - with priority-ranking and financial-feasibility analyses reserved for companion work.

2. A FIVE-PILLAR READINESS FRAMEWORK

Readiness, in the sense used here, denotes the degree to which the enabling conditions required to deliver infrastructure through PPP are in place. It is distinct from appropriateness (whether PPP is a suitable mechanism for a given asset) and from project-level feasibility (whether a specific transaction is bankable). Readiness is a property of the environment; a setting may be an appropriate candidate for PPP yet score low on readiness, which is precisely the diagnostic distinction this framework is built to capture.

Reviews of the CSF literature converge on a recurrent set of enabling conditions. Li et al. [1], analysing PPP/PFI projects in the United Kingdom, grouped success factors into effective procurement, project implementability, government guarantees, favourable economic conditions and an available financial market. Zhang [3] emphasised a favourable investment environment, economic viability, a capable concessionaire, a sound financial package and appropriate risk allocation. Chan et al. [4], from a Chinese perspective, highlighted a stable macroeconomic environment, shared public-private responsibility, transparent procurement, a stable political and social environment and judicious government control. Osei-Kyei and Chan's [2] systematic review of studies published between 1990 and 2013 identified risk allocation, a strong private consortium, political support, community and public support, and a transparent procurement process as the most frequently cited factors. Ismail [5] reported a similar constellation for Malaysia.

Synthesising these studies yields four broad clusters that map naturally onto readiness pillars: an institutional-political cluster (legal framework, political support, governance), an economic-financial cluster (financial market, viability, guarantees), a capacity-and-participation cluster (capable consortium, commitment, transparent procurement) and a risk-and-contract cluster. From these we specify three of our five pillars - legal–institutional (F1), financial-market (F2) and institutional capacity (F3). The two remaining pillars represent the framework's theoretical departures.

The first departure is to treat social acceptance (F4) as a standalone pillar rather than folding it into a generic 'political/social environment' factor. Education is a publicly sensitive service; private participation raises distinctive concerns about commercialisation, affordability and access that do not arise with the same force for a power plant or a toll road. Whether faculty, students, parents and the wider public accept private involvement - and are willing to pay for privately provided services - is a first-order determinant of readiness for education PPP, and warrants separate measurement.

The second departure is to separate land and planning (F5) from the legal pillar. In many CSF studies land is implicit within the legal or economic environment. In a transition economy such as Laos, however, where land is state-owned and use rights are administratively allocated, the clarity of mechanisms for assigning or leasing campus land - and the ability to use land-use rights to support financing - is both distinctive and consequential enough to merit its own pillar. Isolating land also makes the framework more diagnostically useful, because land constraints call for different remedies than legal or financial ones.

Figure 1 presents the resulting framework: five pillars jointly supporting the readiness construct, above a context base that situates the instrument in a developing, transition-economy setting. Each pillar is defined operationally through a small set of sub-components, shown within the pillar. Factors F4 (social acceptance) and F5 (land & planning) are the study's theoretical departures.

Figure 1. The five-pillar readiness framework for education-sector PPP

To translate the framework into a measurement instrument, each pillar (a latent construct) was decomposed into sub-components, and each sub-component was operationalised as a single observed item rated on a five-point Likert scale. This deductive, three-cascade chain (Figure 2) ensures that every survey item can be traced back to a specific theoretical sub-component, supporting content validity by design. Items were drawn from three sources: the CSF literature reviewed above, the Lao legal and contextual setting, and exploratory interviews conducted during instrument development.

Figure 2. Deductive item-generation chain, illustrated for pillar F2

3. METHODS

The study adopts a pragmatist stance and a single-case design, with NUL as the case. NUL was selected as a revelatory critical case: as the largest, oldest and best-resourced university in Laos, it is the setting most likely to be ready for education PPP. If readiness is uneven even at NUL, that is diagnostically informative, signalling that the binding constraints are structural to the country rather than local to a weak institution. The design supports analytic rather than statistical generalisation: the framework and the observed pattern are transferable hypotheses for comparable developing-country settings, to be tested elsewhere.

Readiness perceptions were measured with the fifteen-item scale described in Section 2, embedded within a larger questionnaire. Items were rated from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree). The instrument was translated between English and Lao using back-translation to preserve semantic equivalence, reviewed by experts for content validity, and pilot-tested before full administration.

Respondents were drawn from five stakeholder groups relevant to education PPP in Laos: NUL managers; NUL academic staff; government officials (education and finance); the private sector, banks and construction firms; and independent experts and consultants. Stratifying by stakeholder position was intended both to secure representativeness and to enable later comparison across groups. A total of 139 valid responses were obtained. For a fifteen-item scale this yields a respondent-to-item ratio of about 9.3:1, above the conventional minimum of 5:1 and close to the recommended 10:1 [6].

Analysis proceeded in three steps. Internal-consistency reliability was assessed with Cronbach's alpha, using a 0.70 threshold [7, 8]. The five-pillar structure was then examined by EFA with principal-component extraction and Varimax rotation; sampling adequacy was checked with the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) measure and Bartlett's test of sphericity, and the number of factors was fixed by the eigenvalue-greater-than-one rule with a scree check [6, 9, 10]. Because the five pillars were hypothesised a priori, the EFA is interpreted as an examination of a proposed structure rather than a purely inductive discovery. Finally, the relative importance index (RII), widely used in construction-management research to rank Likert-scaled factors [11], was computed for each item and aggregated to rank the pillars by perceived readiness.

4. RESULTS

4.1. Reliability

Table 1 reports internal-consistency reliability. Four of the five pillars exceed the 0.70 threshold comfortably, with the legal-institutional and financial–market pillars showing high reliability (α = 0.901 and 0.849). The social-acceptance pillar is marginally below at 0.686; this is acceptable for a short, three-item scale measuring a heterogeneous construct, but it is a limitation we return to in the discussion.

Table 1. Internal-consistency reliability by pillar (n = 139)

Pillar	Construct	Items	Cronbach's α
F1	Legal-institutional	3	0.901
F2	Financial-market	3	0.849
F3	Institutional capacity	3	0.772
F5	Land & planning	3	0.771
F4	Social acceptance	3	0.686

4.2. Factor structure

Sampling adequacy was satisfactory (KMO = 0.751) and Bartlett's test was significant ($p < 0.001$), confirming that the data were suitable for factor analysis. Five factors had eigenvalues above one and together explained 72.8% of the variance (Figure 3), a high proportion that indicates the five-pillar structure captures most of the systematic variation in the data.

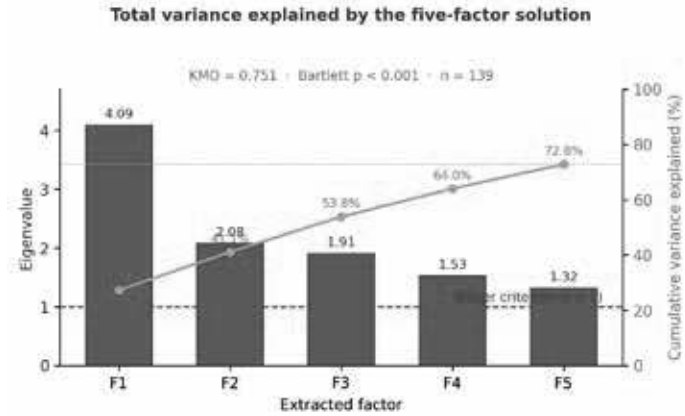


Figure 3. Eigenvalues and cumulative variance explained by the five-factor solution

The rotated component matrix (Table 2) shows a clean simple structure: every item loaded strongly on its intended factor, with loadings ranging from 0.721 to 0.895, and no problematic cross-loadings. The three items written for each pillar grouped together as hypothesised, providing empirical support for the five-pillar specification - including the two novel pillars, social acceptance and land, which emerged as distinct factors rather than dissolving into the legal or economic dimensions.

Table 2. Rotated component matrix: items, loadings and assigned pillar

Item	Content (abbreviated)	Loading	Pillar
I1	Adequate legal framework	0.895	F1
I2	Clear government policy	0.883	F1
I3	Sufficient state capacity	0.881	F1
I4	Banks can supply long-term capital	0.835	F2
I5	Attractive investment environment	0.812	F2
I6	Enough capable investors	0.876	F2
I7	NUL has adequate personnel	0.843	F3
I8	NUL has adequate data	0.809	F3
I9	NUL leadership supportive	0.811	F3
I10	Staff accept private role	0.781	F4
I11	Students/parents will pay	0.807	F4
I12	Society supportive	0.721	F4
I13	Land allocation permitted	0.813	F5
I14	Land reserve available	0.816	F5
I15	Transparent land process	0.825	F5

4.3. Readiness ranking and the inverted pattern

Aggregating item scores into pillar-level RII values produced the ranking in Figure 4. The two highest-scoring pillars are social acceptance (RII = 0.674) and institutional capacity (0.634), both in the 'fairly high' range. The three lowest are land and planning (0.479), legal-institutional (0.477) and, lowest of all, financial-market (0.423). The gap is substantial: the enabling pillars sit above the 0.50 midpoint while the institutional-market pillars fall below it.

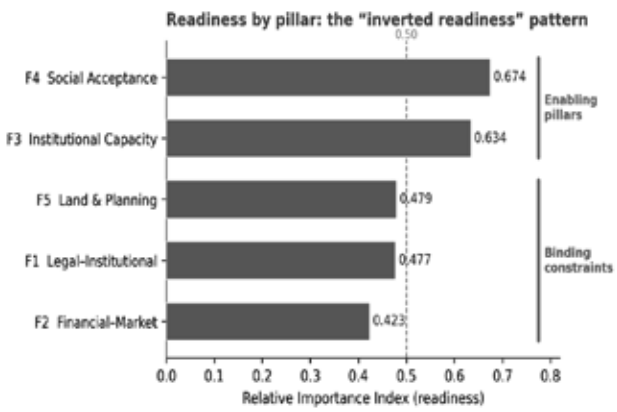


Figure 4. Readiness by pillar (RII): Enabling pillars sit above the 0.50 midpoint; institutional-market pillars fall below it

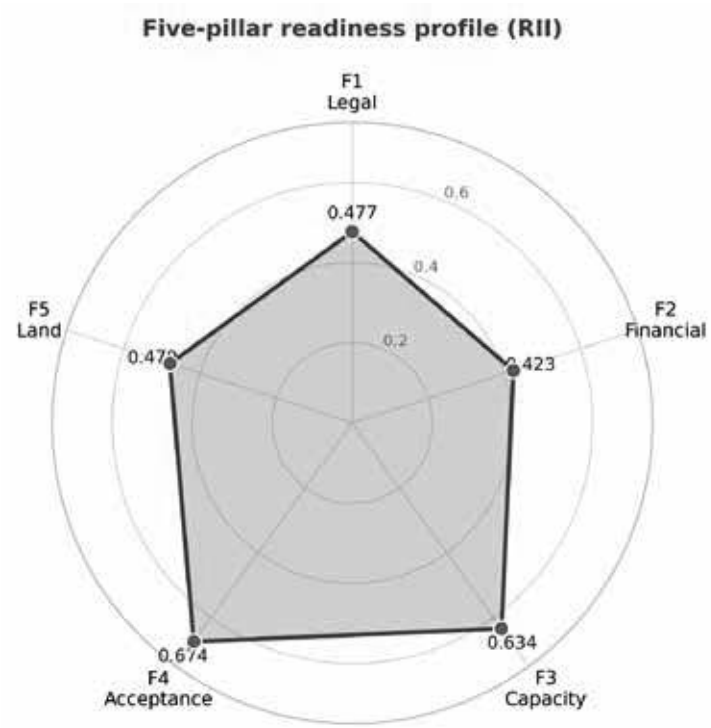


Figure 5. Five-pillar readiness profile, showing the inverted shape

This configuration is what we term inverted readiness. In much of the PPP literature, the conditions assumed to be hardest to secure are political will and public acceptance, while financial and legal machinery is taken as given in developed markets. The Lao pattern inverts this: social acceptance is comparatively abundant, whereas the financial, legal and land machinery is scarce. The radar profile in Figure 5 makes the shape immediately legible - the profile bulges toward acceptance and capacity and pulls sharply inward on the institutional-market side.

5. DISCUSSION

The results carry three implications. First, they reframe the appropriateness debate. That social acceptance and institutional capacity score highest indicates that education PPP is not rejected by stakeholders nor beyond the reach of NUL's capabilities; the obstacles are not about whether PPP is wanted or manageable but about whether the institutional–market environment can support it. Low readiness, in other words, does not negate appropriateness - it prices the institutional and financial cost of realising it. This

distinction, which conflated frameworks obscure, is exactly what a readiness instrument should surface.

Second, the pattern has a clear sequencing implication. Where social licence already exists, reform effort is better spent on the binding constraints - above all the financial pillar, and secondarily the legal and land pillars - than on further cultivating acceptance. For policy, this argues for prioritising financial instruments (viability-gap support, guarantees, availability-based payments), a dedicated legal framework for education PPP, and clearer campus-land mechanisms, rather than diffuse awareness-raising. Because these constraints are institutional and financial rather than attitudinal, they are also, encouragingly, the kind that targeted reform can address.

Third, the analysis supports the framework's two theoretical departures. Both novel pillars - social acceptance and land - emerged as distinct factors with acceptable-to-good loadings, rather than collapsing into the legal or economic dimensions. This provides initial empirical warrant for measuring them separately in education-PPP readiness assessment, at least in transition-economy settings with state-owned land and publicly sensitive education systems. The lower reliability of the social-acceptance pillar (α = 0.686) is worth noting: acceptance spans several stakeholder perspectives - internal, public and willingness-to-pay - which may be only loosely correlated, suggesting the construct could be refined or expanded in future versions of the instrument.

More broadly, the framework contributes to the readiness literature a structure that is both education-specific and developing-country-specific, and a diagnostic logic that separates readiness from appropriateness. Because the constraints it foregrounds - thin capital markets, incomplete PPP law, administratively allocated land - are common across least-developed economies, the instrument and the inverted-readiness hypothesis are plausibly transferable beyond Laos, providing a template that other systems can apply and test.

6. CONCLUSION

This paper developed a five-pillar readiness framework for education-sector PPP and gave it an initial empirical examination in Laos. Factor analysis recovered the hypothesised structure and relative-importance analysis revealed an inverted readiness pattern in which social acceptance and institutional capacity are comparatively strong while the institutional-market pillars - finance above all - bind. The framework's contribution is threefold: a readiness structure adapted to education and to a transition-economy context; the elevation of social acceptance and land to standalone, empirically distinct pillars; and a diagnostic that separates readiness from appropriateness and thereby points reform toward the constraints that actually bind.

Several limitations temper these conclusions and define an agenda for further work. The study rests on a single institution; although chosen as a revelatory critical case, replication across universities and countries is needed to establish generality. The measurement analysis is exploratory: with n = 139 it was not possible to conduct confirmatory factor analysis or structural-equation modelling, and the marginal reliability of the social-acceptance pillar invites refinement. The data are cross-sectional and based on perceptual self-reports, which capture readiness as perceived rather than as objectively measured. Confirmatory validation on larger, multi-country samples - and longitudinal study as education PPPs are eventually implemented - would test both the instrument and the inverted-readiness hypothesis advanced here.

REFERENCES

[1] Li, B., Akintoye, A., Edwards, P. J., Hardcastle, C. Critical success factors for PPP/PFI projects in the UK construction industry. Construction Management and Economics, vol. 23, no. 5, pp. 459-471, 2005.

[2] Osei-Kyei, R., Chan, A. P. C. Review of studies on the critical success factors for public-private partnership (PPP) projects from 1990 to 2013. International Journal of Project Management, vol. 33, no. 6, pp. 1335-1346, 2015.

[3] Zhang, X. Critical success factors for public-private partnerships in infrastructure development. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 131, no. 1, pp. 3-14, 2005.

[4] Chan, A. P. C., Lam, P. T. I., Chan, D. W. M., Cheung, E., Ke, Y. Critical success factors for PPPs in infrastructure developments: Chinese perspective. Journal of Construction Engineering and Management, vol. 136, no. 5, pp. 484-494, 2010.

[5] Ismail, S. Critical success factors of public-private partnership (PPP) implementation in Malaysia. Asia-Pacific Journal of Business Administration, vol. 5, no. 1, pp. 6-19, 2013.

[6] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E. Multivariate Data Analysis (7th ed.). Pearson, 2010.

[7] Cronbach, L. J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika, vol. 16, no. 3, pp. 297-334, 1951.

[8] Nunnally, J. C. Psychometric Theory (2nd ed.). McGraw-Hill, 1978.

[9] Kaiser, H. F. An index of factorial simplicity. Psychometrika, vol. 39, no. 1, pp. 31-36, 1974.

[10] Field, A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics (5th ed.). Sage, 2018.

[11] Kometa, S. T., Olomolaiye, P. O., Harris, F. C. Attributes of UK construction clients influencing project consultants' performance. Construction Management and Economics, vol. 12, no. 5, pp. 433-443, 1994.

[12] Creswell, J. W., Plano Clark, V. L. Designing and Conducting Mixed Methods Research (3rd ed.). Sage, 2018.

[13] Yin, R. K. Case Study Research and Applications: Design and Methods (6th ed.). Sage, 2018.

[14] Saunders, M., Lewis, P., Thornhill, A. Research Methods for Business Students (8th ed.). Pearson, 2019.

[15] Brislin, R. W. Back-translation for cross-cultural research. Journal of Cross-Cultural Psychology, vol. 1, no. 3, pp. 185-216, 1970.

HABECO Est.1890

BIA HƠI HÀ NỘI
THƯƠNG HIỆU QUỐC GIA

NGƯỜI DƯỚI 18 TUỔI KHÔNG ĐƯỢC UỐNG RƯỢU, BIA

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