05-2026 | ISSN 2734-9888 | tapchixaydung.vn

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA BỘ XÂY DỰNG

JOURNAL OF CONSTRUCTION

CÔNG TY TNHH KHÔNG GIAN PHƯƠNG ĐÔNG:

15 NĂM KIẾN TẠO KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ VÀ GIÁ TRỊ CỘNG ĐỒNG

Orient Space

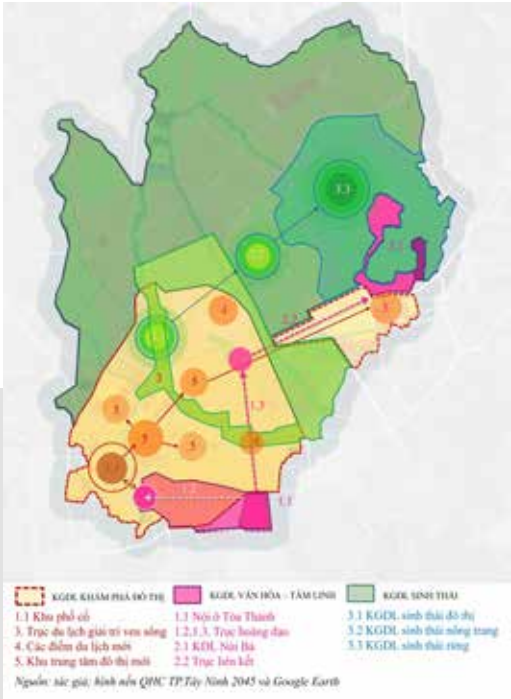
Tiền thân từ Orient Space Group, **Công ty TNHH Không gian Phương Đông (Orient Space Co., Ltd.,)** thành lập ngày 11/11/2011. Trải qua chặng đường 15 năm, Orient Space đã khẳng định vị thế uy tín chuyên sâu trong các lĩnh vực: Tư vấn thiết kế quy hoạch, Kiến trúc, Nghiên cứu khoa học và Giáo dục mỹ thuật.

Thế mạnh của chúng tôi hội tụ ở đội ngũ Thạc sĩ - Kiến trúc sư, Kỹ sư và các chuyên gia giáo dục tận tâm. **Orient Space** luôn sát cánh cùng khách hàng với sứ mệnh xuyên suốt: "Kiến tạo không gian đô thị, thiết kế mang ý nghĩa cuộc sống và giáo dục hướng tới phát triển toàn diện", nhằm hiện thực hóa những công trình mang giá trị bền vững cho thế hệ mai sau.

Orient Space

Năng lực thực tiễn của **Orient Space** được minh chứng sắc nét qua nhiều dự án trọng điểm mang tính cộng đồng cao:

- **Quy hoạch & Nghiên cứu:** Đồ án cải tạo cảnh quan Làng cổ Đông Hòa Hiệp (Cái Bè - Tiền Giang cũ) dựa trên cộng đồng; Nghiên cứu chiến lược định hướng phát triển không gian du lịch TP. Tây Ninh.
- **Giáo dục:** Dự án "Lớp vẽ OS - Cùng vẽ ước mơ" đã chắp cánh đam mê cho hơn 1.000 học viên mỹ thuật, du học quốc tế.



Orient Space - Không chỉ thiết kế công trình, chúng tôi kiến tạo những giá trị sống ý nghĩa.

CÔNG TY CỔ PHẦN
TƯ VẤN THIẾT KẾ CẦU LỚN - HẦM (BRITEC)

ISO 9001:2015

Công ty Cổ phần Tư vấn thiết kế Cầu Lớn - Hầm (BRITEC), tiền thân là Ban Nghiên cứu thiết kế cầu Thăng Long được thành lập ngày 12/05/1973. Sau nhiều lần thay đổi, từ năm 2006 đến nay Công ty là doanh nghiệp cổ phần 100%.

LĨNH VỰC HOẠT ĐỘNG CHÍNH:

Tư vấn khảo sát, thiết kế, giám sát thi công xây dựng cầu, hầm, đường và nút giao thông.

Với nguồn nhân lực chất lượng cao cùng hệ thống máy móc thiết bị hiện đại và đầu tư bài bản, Công ty luôn sẵn sàng cung cấp các dịch vụ tư vấn với yêu cầu khắt khe về chất lượng và tiến độ của khách hàng. Nhờ vậy, trong suốt quá trình từ khi thành lập đến nay, Công ty luôn nhận được sự tin tưởng của quý đối tác.

Các dự án sử dụng nguồn vốn nước ngoài như: WB, ADB, JICA, KOICA.. mà Công ty đã và đang thực hiện cũng luôn nhận được sự đánh giá cao từ các chuyên gia nước ngoài cũng như các Hiệp hội Tư vấn trong và ngoài nước.

Chặng đường hơn nửa thế kỷ trưởng thành và phát triển Công ty luôn kiên định mục tiêu áp dụng các tiến bộ về khoa học kỹ thuật, công nghệ tiên tiến nhằm tạo ra những sản phẩm không những đáp ứng các yêu cầu về phát triển hạ tầng giao thông mà còn tạo các điểm nhấn về kiến trúc, cảnh quan của nhiều địa phương.

CÁC CÔNG TRÌNH, DỰ ÁN TIÊU BIỂU:

- Cầu Rạch Miễu
- Cầu Bến Tre 1
- Cầu Rồng
- Cầu Trần Thị Lý
- Cầu Cổ Lũy
- Cầu Móng Sến
- Cầu Phước An
- Cầu Cửa Đại
- Hầm Đèo Ngang
- Hầm Mũi Trâu
- Hầm Tam Điệp
- Hầm Thần Vũ
- Đường ven biển Hải Phòng
- Nút giao Nam Cầu Bính
- Nút Giao phía Nam Cầu Vĩnh Tuy
- Đường cao tốc Vân Đồn - Móng Cái

Địa chỉ : 278 Tôn Đức Thắng, phường Ô Chợ Dừa, Thành phố Hà Nội
Điện thoại : (+84.24) 38513040 - Fax: (+84.24) 35110682
Email: contact@britec.com.vn - Website:britec.com.vn

MỤC LỤC CONTENT

05.2026 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
TS Lê Văn Cư - 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
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: Với tầm nhìn xuyên thế kỷ, Hà Nội xác định sông Hồng là trục cảnh quan chủ đạo, trung tâm của cấu trúc đô thị đối xứng, lấy dòng sông làm "mặt tiền".

Giá 75.000 đồng

QUẢN LÝ NGÀNH

NGỌC LÝ 6 Quản lý chất lượng hạ tầng giao thông đường bộ: Đảm bảo tính bền vững cho toàn hệ thống
THANH NGA 8 Điều chỉnh hợp đồng xây dựng khi giá vật liệu biến động phải theo từng trường hợp
MINH THÀNH 10 Dự thảo bộ luật hàng hải và đường thủy Việt Nam (sửa đổi): Tạo động lực mới cho phát triển kinh tế biển

TỪ CHÍNH SÁCH ĐẾN CUỘC SỐNG

KTS PHẠM THANH TÙNG 12 Sông Hồng trong không gian Hà Nội mới
TS.KTS TRẦN THỊ LAN ANH 14 Hình thành hệ thống đô thị thế hệ mới tại Việt Nam 2050 trên nền tảng an ninh xanh và khả năng chống chịu
TS.KTS BÙI DUY ĐỨC 18 Từ phong trào "bỏ phố về vườn" tới mô hình "đô thị nông nghiệp", tăng cường mạng lưới sinh thái tại Việt Nam
THS LÊ TÙNG LÂM, THS TRẦN NGỌC HIẾU 22 Số hóa vật liệu "Xanh" hướng tới Net Zero
PGS.TS NGUYỄN THANH SANG 24 Thiết kế thành phần bê tông cho đường sắt tốc độ cao: Cần tiếp cận theo tuổi thọ công trình
GS QIANG YUAN 28 Công nghệ sản xuất và thi công cấu kiện bê tông đúc sẵn cho đường sắt tốc độ cao Trung Quốc: Tăng tốc xây dựng nhưng phải kiểm soát chặt chẽ vật liệu, nhiệt độ và quy trình
TS YU CHENG 31 Công nghệ phụ gia cho sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn - lắp ghép: Hướng tới cường độ sớm, giảm dưỡng hộ nhiệt và phát thải CO_2

TRÒ CHUYỆN VỚI CHUYÊN GIA

TS LÊ QUANG HÙNG 34 Ngành Xây dựng mở đường và dẫn dắt tăng trưởng trong kỷ nguyên mới

GÓC NHÌN TỪ THỰC TIỄN

NGUYỄN HOÀNG LINH 40 Ám ảnh rác thải pin xe điện!

GIỚI THIỆU SÁCH MỚI

AN NHIÊN 42 Bộ sách "Công nghệ ô tô điện": Hệ thống hóa kiến thức từ sử dụng an toàn đến công nghệ nền tảng

NGHIÊN CỨU KHOA HỌC

TRẦN THỊ VIỆT HÀ, VÕ TRỌNG NGHĨA 43 Xác định vị trí điểm trung chuyển giao thông công cộng tại TP Hồ Chí Minh
THS.NCS DƯƠNG QUỲNH NGA, PGS.TS LÊ QUỲNH CHI 48 Mô hình Quy hoạch không gian xung quanh các ga đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam: Lý luận trên thế giới và định hướng cho Việt Nam
GS.TS.KTS DOÃN MINH KHÔI, KTS CAO THÀNH NGHIỆP 54 Nhận diện cấu trúc nền tảng cho định hướng phát triển không gian đô thị Hà Nội
GS.TS.KTS NGUYỄN QUỐC THÔNG 59 Bàn về xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam
THS.KTS LƯƠNG VŨ ĐÀM NINH, TS.KTS NGÔ THỊ KIM DUNG 66 Mô hình và giải pháp quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch tỉnh Quảng Ninh dưới góc độ quản lý đô thị
THS.KTS NGUYỄN DUY THANH 70 Chuyển dịch TOD sang mạng lưới vùng tại TP Hồ Chí Minh: Khung chính sách và chiến lược phân tầng không gian
TS ĐỖ HỒNG ANH, TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO, PGS.TS ĐẶNG THỊ THANH HUYỀN 75 Khảo sát chất lượng môi trường trong các xưởng làng nghề tái chế nhựa: Nghiên cứu điển hình tại làng Phan Bôi, tỉnh Hưng Yên
TS NGUYỄN LAN HƯƠNG, TS PHẠM DUY ĐÔNG, GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA 80 Xây dựng bản đồ chất lượng nước nhằm đánh giá sự biến đổi theo không gian và thời gian của một số sông cấp nước chính cho khu vực đô thị TP Hải Phòng
TS NGUYỄN THANH PHONG 85 Ứng dụng nguyên lý khóa thủy lực trong thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa theo giới hạn tổn thất lọc
THS MAI THỊ DUYÊN 90 Công tác kiểm kê đất đai và thành lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2024 sau khi sáp nhập đơn vị hành chính: Nghiên cứu tại xã Phước Long, tỉnh Cà Mau
THS NGUYỄN THÀNH CÔNG 94 Tổng quan công nghệ lọc nano đặt ngập trong xử lý nước mặt và tiềm năng ứng dụng tại Việt Nam
TS TRẦN ĐỒNG KIẾM LAM, THS NGUYỄN ĐỨC KHIÊM 99 Đánh giá ứng dụng cọc đá trong cải thiện khả năng chống hóa lỏng của nền đất cát: Bằng chứng thực nghiệm và các thách thức nghiên cứu
TS LÊ NGỌC LAN 104 Cơ chế và đặc trưng lực bám dính giữa cốt thép và bê tông nhẹ cốt liệu tái chế dưới ảnh hưởng của cường độ chịu nén
THS BÙI NAM PHƯƠNG, NGUYỄN DUY TÂN, NGUYỄN NGỌC TÂM NHƯ 108 Xây dựng khung đánh giá tiên tiến cho vật liệu xanh tại cảng hàng không Việt Nam
TS BÙI THANH QUANG 112 Sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng hợp kim nhớ hình
TS NGUYỄN ĐĂNG HANH 116 Nghiên cứu hiện tượng carbonat hóa của vữa xi măng trong môi trường CO_2 siêu tới hạn
TS VÕ NGUYỄN PHÚ HUÂN 120 Phân tích ứng xử móng nông bằng phần tử hữu hạn 3D trong các điều kiện địa chất khác nhau
PGS.TS TRẦN THỊ THÚY VÂN, TS ĐÀO NGỌC KHOA 126 Phân tích ổn định phi tuyến của hệ khung phẳng bằng phương pháp phần tử hữu hạn
GS.TS HOÀNG XUÂN LƯỢNG, THS NGUYỄN XUÂN QUÂN, THS LÊ TUẤN ANH, TS NGUYỄN CHÍ THỌ, THS NGUYỄN BÁ NGỌC THẢO 130 Nghiên cứu dao động riêng của dầm hai lớp có lỗ rỗng vi mô trên nền đàn hồi pasternak chịu nén dọc trục

INDUSTRY MANAGEMENT

NGOC LY 6 Road infrastructure quality management: Ensuring system sustainability

THANH NGA 8 Adjustments to construction contracts due to fluctuating material prices must be made on a case-by-case basis.

MINH THANH 10 Draft amendments to the Vietnamese Law on Maritime and Inland Waterways: Creating new impetus for the development of the marine economy.

FROM POLICY TO LIFE

PHAM THANH TUNG 12 The Red River in the context of the new Hanoi

TRAN THI LAN ANH 14 Forming a next-generation urban system in Vietnam by 2050 based on green security and resilience.

BUI DUY DUC 18 From the "return to the countryside" movement to the "agricultural city" model, strengthening ecological networks in Vietnam.

LE TUNG LAM, TRAN NGOC HIEU 22 Digitizing "Green" materials towards Net Zero

NGUYEN THANH SANG 24 Designing concrete components for high-speed rail: A lifespan of the structure approach is needed

QIANG YUAN 28 Technology for manufacturing and constructing precast concrete components for China's high-speed rail: Accelerating construction but requiring tight control over materials, temperature, and processes.

YU CHENG 31 Additive technology for the production of precast concrete components: Towards early strength, reduced heat curing and CO_2 emissions.

TALK WITH EXPERTS

LE QUANG HUNG 34 The Construction industry paves the way and leads growth in the new era.

PERSPECTIVE TO PRACTICAL

NGUYEN HOANG LINH 40 The obsession with electric vehicle battery waste!

ABOUT NEW BOOK

AN NHIEN 42 The book series "Electric Vehicle Technology": Systematizing knowledge from safe usage to fundamental technology.

SCIENTIFIC RESEARCH

TRAN THI VIET HA, VO TRONG NGHIA 43 Spatial identification of public transport interchange hubs in Ho Chi Minh City

DUONG QUYNH NGA, LE QUYNH CHI 48 Planning models for North-South High-speed railway station areas: Global theoretical frameworks and Strategic orientations for Vietnam

DOAN MINH KHOI, CAO THANH NGHIEP 54 Identifying the foundational structures for guiding Hanoi's urban spatial development

NGUYEN QUOC THONG 59 Discussing the national modern trend in Vietnamese architecture

LUONG VU DAM NINH, NGO THO KIM DUNG 66 Models and solutions for the management of architectural heritage at tourist sites in Quang Ninh province from an urban management perspective

NGUYEN DUY THANH 70 Shifting TOD to regional network in HCMC: Policy framework and Spatial stratification strategy

DO HONG ANH, NGUYEN PHUONG THAO, DANG THI THANH HUYEN 75 Investigation of environmental quality in plastic recycling workshops: Case study in phan boi village, Hung Yen province

NGUYEN LAN HUONG, PHAM DUY DONG, TRAN THI VIET NGA 80 Water quality mapping using water quality index to assess the temporal and spatial variations of water quality at some major water intake points supplying water for Hai Phong city

NGUYEN THANH PHONG 85 Application of the hydraulic lock principle to the design of self-washing floating-media filters at terminal head loss

MAI THI DUYEN 90 Land Inventory and Compilation of the 2024 Current Land Use Map Following Administrative Unit Consolidation: A Case Study in Phuoc Long Commune, Ca Mau Province

NGUYEN THANH CONG 94 A review of submerged nanofiltration technology for surface water treatment and its potential applications in Vietnam

TRAN DONG KIEM LAM, NGUYEN DUC KHIEM 99 Stone columns for liquefaction mitigation in sandy soils: Experimental evidence and research challenges

LE NGOC LAN 104 Bond mechanisms and characteristics between steel reinforcement and recycled lightweight aggregate concrete under the influence of compressive strength

BUI NAM PHUONG, NGUYEN DUY TAN, NGUYEN NGOC TAM NHU 108 Integrated design framework for optimizing Vietnam's passenger terminals: Balancing national and international standards

BUI THANH QUANG 112 Repair and strengthening of reinforced concrete structures using shape memory alloys

NGUYEN DANG HANH 116 Study on the carbonation of cement mortar in supercritical CO_2

VO NGUYEN PHU HUAN 120 Three-dimensional finite element ananlysis of shallow foundation behavior under different geological conditions

TRAN THI THUY VAN, DAO NGOC KHOA 126 Nonlinear stability analysis of plane frame systems using the finite element method

HOANG XUAN LUONG, NGUYEN XUAN QUAN, LE TUAN ANH, NGUYEN CHI THO, NGUYEN BA NGOC THAO 130 Free vibration analysis of a two-layer beam with microscale porous voids on a pasternak elastic foundation under axial compression

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
Dr. Le Van Cu
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
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

05.2026 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
TS Lê Văn Cư - 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 VĂN PHÚC 136 Ảnh hưởng của bề rộng tấm sợi các-bon gia cường đến ứng xử bám dính của tấm sợi các-bon với bê tông

KS HUỲNH CHÍ HIẾU, TS NGÔ VĂN THỨC, THS ĐINH HOÀI LUÂN, THS NGUYỄN LÊ TÀI, THS BÙI THỊ NGỌC HIỀN 140 Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP

TS PHẠM HOÀNG 144 Phân tích một số nguyên nhân gây hư hỏng công trình bê tông cốt thép

KS NGUYỄN ĐẠI PHÁT, TS NGUYỄN HOÀNG TÙNG, PGS.TS TRƯƠNG ĐÌNH NHẬT, THS LÊ THỊ THÙY LINH 147 Tối ưu hóa tiết diện kết cấu thép nhà dân dụng bằng thuật toán SAPSO hiệu chỉnh tích hợp với SAP2000-OAPI

KHÚC HỒNG VÂN, TRẦN MẠNH CƯỜNG, TẠ QUANG HUY, NGUYỄN NGỌC THẮNG 152 Nghiên cứu khả năng chịu uốn kết cấu dầm bê tông cốt thép cải tiến bọc thép chữ U

THS.NCS CAO TRỌNG CÔNG, PGS.TS NGUYỄN ĐỨC MẠNH, THS NGUYỄN ĐÌNH DŨNG, THS LÊ ANH ĐỨC 155 Ứng dụng mạng nơ-ron sâu dự báo góc ma sát trong của đất loại sét lẫn dăm sạn

TÀO VĂN CHIẾN 160 Ứng dụng phần mềm Universal Mechanism (UM) trong mô phỏng động lực học toa xe

THS PHẠM HUY KHƯƠNG 164 Nghiên cứu thiết kế hoán cải bộ phận chạy phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW để phục vụ thi công trên đường sắt mỏ

BÙI VĂN TUYÊN 168 Áp dụng thuật toán ma trận để tối ưu tính toán thời gian thi công theo phương pháp dây chuyền

NGUYỄN MINH PHÚC, NGUYỄN VĂN AN, LƯU ANH VĂN, TS MAI QUANG HUY 172 Mô phỏng số dòng xoáy qua cụm trụ cầu đặt nối tiếp tại số Reynolds thấp

THS NGUYỄN THANH DIỆU, PGS.TS PHAN VĂN HƯNG, TS MAI XUÂN HƯƠNG 176 Phát triển ứng dụng và đánh giá hiệu quả công cụ tra cứu trực tuyến hỗ trợ kiểm soát hoạt động luân chuyển hàng nguy hiểm qua cảng biển Việt Nam

NGUYỄN NGỌC ANH, HOÀNG MAI PHƯƠNG, NGUYỄN ĐẠT HIẾU, LƯU THỊ KIM THÚY, TS NGUYỄN XUÂN THỊNH 180 Nghiên cứu phương án kỹ thuật đo đạc kiểm tra độ lệch công trình vòng quay mặt trời Sun Wheel

THS HOÀNG HỮU ĐỨC, TS NGUYỄN VĂN KHÁNH, KS TRẦN NGUYỄN TUẤN PHÁT 184 Lập trình công cụ và phân tích biến động lớp phủ bề mặt đất từ dữ liệu GIS viễn thám - thực nghiệm tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh

PGS.TS NGUYỄN VĂN SƯỚNG, THS PHẠM TẤT TIỆP, THS PHẠM VĂN LUÂN 190 Bộ điều khiển trượt thích nghi tích hợp bộ quan sát nhiễu cho hệ thống vây giảm lắc ngang tàu thủy

TS TRẦN HẢI VIỆT, TS NGUYỄN THỊ THÚY HỒNG, THS PHAN THỊ BÍCH NGỌC 194 Xây dựng lộ trình ưu tiên thực hành ESG tại cụm cảng container Hải Phòng: Tiếp cận bằng mô hình ra quyết định đa tiêu chí lai Fuzzy Delphi và Fuzzy AHP

TS TRẦN HỮU LONG, THS LƯU NGỌC THIỆN 198 Nghiên cứu hiện trạng, biến động môi trường nước khu vực nuôi lồng bè ven biển Hải Phòng

TS NGUYỄN PHAN ANH, TS ĐẶNG XUÂN THAO, TS TRẦN NGỌC AN, PGS.TS NGUYỄN HỒNG SƠN 202 Phân tích ảnh hưởng của các tham số khí động đến mất ổn định flutter của dầm cầu nhịp lớn

TS TRỊNH MINH HẢI, THS VŨ NGỌC TRINH 206 Đánh giá nguyên nhân nứt bản mặt cầu bê tông cốt thép qua quan trắc biến dạng do tải trọng và nhiệt độ môi trường

THS.NCS NGUYỄN HỮU GIANG, TS NGUYỄN ANH TUẤN, THS.NCS NGUYỄN HỮU ANH 210 Nghiên cứu ứng dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" trong phần mềm RM bridge để xác định các thông số động lực học kết cấu cầu đường sắt tốc độ cao

TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO 214 Xu hướng xây dựng thành phố thông minh bền vững: Tiếp cận tích hợp kinh tế - môi trường - xã hội và đánh giá vòng đời (LCA)

TS NGUYỄN VĂN TRUNG, THS NGUYỄN THÁI SƠN, TS LÊ VĂN TUẤN 220 Kiên cố hóa trường lớp tại khu vực biên giới: Đánh giá tiến trình chính sách và giải pháp thực thi

TS TẠ VĂN PHẤN, TS CHU TUẤN LONG 224 Đánh giá định lượng hiệu quả đầu tư hệ cốp pha nhôm tích hợp tự động hóa trong thi công nhà cao tầng

THS NGUYỄN LÊ MINH LONG, PGS.TS LƯU TRƯỜNG VĂN 229 Phát triển mô hình khái niệm cho thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường: Một nghiên cứu Delphi

TS ĐỖ THỊ HUYỀN, THS VŨ VĂN HIỆP 234 Nghiên cứu ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong kiểm soát nội bộ tại doanh nghiệp xây dựng

TS NGUYỄN ĐĂNG HANH, KS LƯU HOÀNG NGA 238 Áp dụng phương pháp trả lương 3P trong các doanh nghiệp xây dựng dân dụng vừa và nhỏ

TS LÊ TRỌNG TÙNG, NGUYỄN VĂN HOÀI, NGUYỄN NGỌC NGHĨA NGHĨA, TRỊNH VŨ CẨM QUỲNH 244 Ảnh hưởng của các yếu tố đến chuyển đổi số trong doanh nghiệp xây dựng trên địa bàn TP Hồ Chí Minh

THS NGUYỄN HOÀNG LONG, PGS.TS NGUYỄN ANH TUẤN, PGS.TS NGUYỄN VĂN TIẾP 248 Nhận diện các yếu tố rủi ro ảnh hưởng tới thành công dự án hạ tầng giao thông thông minh theo hình thức hợp tác công tư (PPP) trong giai đoạn triển khai

TS ĐỖ VĂN THUẬN, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI 253 Phân tích tác động của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ tại Việt Nam

TS VŨ MINH TÂM, TS THÁI HỒNG NAM 256 Một số vấn đề về tổ chức giao thông bằng vạch sơn, biển báo trên đường ô tô cao tốc ở Việt Nam

KS LÊ THỊ NGỌC, TS HÀ THANH TÙNG 262 Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân TP Hà Nội

TS TRƯƠNG TRỌNG VƯƠNG, KS ĐỖ HỒNG SƠN, THS NGUYỄN XUÂN PHÚ, KS NGUYỄN HUY CÔNG 267 Nghiên cứu tính toán ổn định ray hàn liền và ứng dụng trên đoạn đường sắt Hà Nội - TP Hồ Chí Minh

TS PHẠM HỮU HÀ GIANG, NGUYỄN NHẬT HÀO, TRẦN ĐỨC KHANH, LÊ NGỌC TÂN, HUỲNH VĂN HIỆP 270 Sự phát triển vùng ảnh hưởng trong nền đất yếu dưới tác động của cố kết bằng hút chân không

ĐỖ TRỌNG NGHĨA 274 Tổng quan các kỹ thuật cảm biến từ xa để giám sát và phân tích định lượng sự phát triển vết nứt trong tường nhà

TRAN VAN PHUC	136	Effect of CFRP sheet width on the bond behavior of CFRP-concrete interfaces
HUYNH CHI HIEU, NGO VAN THUC, DINH HOAI LUAN, NGUYEN LE TAI, BUI THI NGOC HIEN	140	Study of the flexural behavior of high-strength concrete GFRP reinforced beams
PHAM HOANG	144	Analyze several causes of deterioration in reinforced concrete structure
NGUYEN DAI PHAT, NGUYEN HOANG TUNG, TRUONG DINH NHAT, LE THI THUY LINH	147	Optimization of steel sections for Residential Buildings using Modified SAPSO Algorithm integrated with SAP2000-OAPI
KHUC HONG VAN, TRAN MANH CUONG, TA QUANG HUY, NGUYEN NGOC THANG	152	Study on the flexural capacity of improved reinforced concrete beam with U-shaped steel jacketing
CAO TRONG CONG, NGUYEN DUC MANH, NGUYEN DINH DUNG, ANH DUC	155	Application of deep neural networks for predicting internal friction angle of gravelly clay soils
TAO VAN CHIEN	160	Application of Universal Mechanism (UM) software in railcar dynamic simulation
PHAM HUY KHUONG	164	Research on the design of running gear modification for the ATLAS 1404 KZW railway specialized vehicle for construction on mine railways
BUI VAN TUYEN	168	Application of a matrix algorithm to optimize the calculation of construction duration in flow-line construction organization
NGUYEN MINH PHUC, NGUYEN VAN AN, LUU ANH VAN, MAI QUANG HUY	172	Numerical analysis of flow past tandem bridge piers at low Reynolds number
NGUYEN THANH DIEU, PHAN VAN HUNG, MAI XUAN HUONG	176	Development and performance evaluation of an online search tool for controlling the movement of dangerous goods through Vietnamese seaports
NGUYEN NGOC ANH, HOANG MAI PHUONG, NGUYEN DAT HIEU, LUU THI KIM THUY, NGUYEN XUAN THINH	180	Research on technical method for surveying the deviation of the Sun Wheel
HOANG HUU DUC, NGUYEN VAN KHANH, TRAN NGUYEN TUAN PHAT	184	Development of computational tools and analysis of land cover dynamics using remote sensing-based gis data: an experimental study in Long An ward, Tay Ninh province
NGUYEN VAN SUONG, PHAM TAT TIEP, PHAM VAN LUAN	190	Adaptive sliding mode controller for ship antiroll fin stabilization based on disturbance observer
TRAN HAI VIET, NGUYEN THI THUY HONG, PHAN THI BICH NGOC	194	Developing a priority roadmap for esg practices in the Haiphong container port cluster: A hybrid Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP multi-criteria decision-making approach
TRAN HUU LONG, LUU NGOC THIEN	198	Study on the status and fluctuations of water environment in cage aquaculture in Hai Phong coastal
NGUYEN PHAN ANH, DANG XUAN THAO, TRAN NGOC AN, NGUYEN HONG SON	202	Analysis of flutter derivatives affecting aeroelastic instability of long-span bridge decks
TRINH MINH HAI, VU NGOC TRINH	206	Assessment of the causes of cracking in reinforced concrete bridge decks through monitoring of deformation due to load and environmental temperature
NGUYEN HUU GIANG, NGUYEN ANH TUAN, NGUYEN HUU ANH	210	Research on the application of the "Fast Rolling Stock" module in RM bridge software to determine dynamic parameters of high-speed railway bridge structures
NGUYEN PHUONG THAO	214	Emerging trends in smart sustainable City development: Integrating Economic, Environmental, and Social Dimensions with Life Cycle Assessment (LCA)
NGUYEN VAN TRUNG, NGUYEN THAI SON, LE VAN TUAN	220	School solidification in border areas: Evaluation of policy progress and implementation solutions
TA VAN PHAN, CHU TUAN LONG	224	Quantitative assessment of investment efficiency in automation-integrated aluminum formwork systems in high-rise building construction
NGUYEN LE MINH LONG, LUU TRUONG VAN	229	Developing a Conceptual model for Circular economy practices on construction sites: A Delphi study
DO THI HUYEN, VU VAN HIEP	234	Research on applying the three lines of defense model to internal control in construction enterprises
NGUYEN DANG HANH, LUU HOANG NGA	238	Application of the method of 3P salary paying in small and medium construction enterprises
LE TRONG TUNG, NGUYEN VAN HOAI, NGUYEN NGOC NGHIA NGHIA, TRINH VU CAM QUYNH	244	Factors influencing digital transformation in construction enterprises in Ho Chi Minh City
NGUYEN HOANG LONG, NGUYEN ANH TUAN, NGUYEN VAN TIEP	248	Identification of risk factors influencing the success of smart transportation infrastructure projects under Public-Private Partnership (PPP) during the execution stage
DO VAN THUAN, NGUYEN LUONG HAI	253	Analyzing the impact of capital plan control activities on the disbursement progress of public investment in road transport projects in Vietnam
VU MINH TAM, THAI HONG NAM	256	Issues in traffic organization using pavement markings and traffic signs on expressways in Vietnam
LE THI NGOC, HA THANH TUNG	262	Research on factors influencing the electric motorcycle choice behavior of residents in Hanoi City
TRUONG TRONG VUONG, DO HONG SON, NGUYEN XUAN PHU, NGUYEN HUY CONG	267	The stability analysis of continuous welded rail (CWR) and its application on the Hanoi - Ho Chi Minh City railway line
PHAM HUU HA GIANG, NGUYEN NHAT HAO, TRAN DUC KHANH, LE NGOC TAN, HUYNH VAN HIEP	270	Smear zone development in soft ground under vacuum consolidation
DO TRONG NGHIA	274	Remote sensing techniques for monitoring and quantitative analysis of crack development in building walls: A comprehensive review

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
Dr. Le Van Cu
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

QUẢN LÝ CHẤT LƯỢNG HẠ TẦNG GIAO THÔNG ĐƯỜNG BỘ:

Đảm bảo tính bền vững cho toàn hệ thống

NGỌC LÝ

Trong bối cảnh đẩy mạnh phát triển hạ tầng giao thông quốc gia, các đề xuất về việc kéo dài thời hạn bảo hành công trình lên 10 năm và công khai hóa trách nhiệm nhà thầu đang thu hút sự quan tâm lớn từ dư luận.

Từ các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế và pháp lý liên quan đến đề xuất của doanh nghiệp trong tương quan với thông lệ quốc tế và thực tiễn Việt Nam, việc quản lý chất lượng phải dựa trên nền tảng khoa học vận hành công trình, quản trị rủi ro tài chính và hệ thống pháp luật đồng bộ, thay vì áp dụng các cơ chế cá biệt mang tính cảm tính.

ĐẶT VẤN ĐỀ

Quản lý chất lượng công trình giao thông là một mắt xích then chốt trong việc tối ưu hóa hiệu quả đầu tư công. Mới đây, Văn bản số 1462-CV/VPTW ngày 02/4/2026 của Văn phòng Trung ương Đảng về việc lấy ý kiến đánh giá các đề xuất của Công ty Sơn Hải đã mở ra một diễn đàn thảo luận sâu rộng về trách nhiệm của nhà thầu. Các kiến nghị tập trung vào ba nội dung: Kéo dài thời hạn bảo hành lên 10 năm, cắm biển công khai danh tính nhà thầu trên tuyến và điều chỉnh cơ chế giữ tiền bảo hành.

Để có cái nhìn khách quan, Bộ Xây dựng đã phối hợp với các cơ quan chuyên môn và hiệp hội nghề nghiệp nhằm phân tích các đề xuất này dưới lăng kính khoa học và thực tiễn.

SỰ PHÂN TÁCH GIỮA "BẢO HÀNH" VÀ "BẢO TRÌ"

Dưới góc độ kỹ thuật hạ tầng, mọi kết cấu công trình đều tuân theo quy luật hao mòn tự nhiên. Một công trình đường bộ tiêu chuẩn bao gồm nhiều thành phần với tuổi thọ kỹ thuật khác nhau. Việc đề xuất một mức bảo hành chung 10 năm cho toàn bộ công trình giao thông cho thấy:

Sự chồng lấn với chu kỳ bảo trì: Theo quy trình vận hành hạ tầng giao thông, mốc 5 - 7 năm là thời điểm bắt đầu chu kỳ trùng tu và 10 - 12 năm là chu kỳ đại tu. Tại thời điểm này, các vật liệu như bê tông nhựa sẽ xuất hiện hiện tượng lão hóa do tác động của nhiệt độ, tia UV và oxy hóa (làm giòn nhựa đường).

Khó khăn trong giám định: Nếu kéo dài bảo hành đến 10 năm, việc phân định giữa "hư hỏng do thi công kém" (trách nhiệm bảo hành của nhà thầu) và "hao mòn tự nhiên/hết niên hạn sử dụng lớp phủ" (trách nhiệm bảo trì của Nhà nước) trở nên cực kỳ phức tạp. Điều này dễ dẫn đến các tranh chấp pháp lý kéo dài, gây tắc nghẽn trong công tác quản lý vận hành.

Đối chiếu thông lệ quốc tế: Số liệu thực chứng từ các quốc gia có hạ tầng phát triển cho thấy một cách tiếp cận phân lớp thay vì cào bằng:

Tại Nhật Bản: Thời hạn bảo hành phổ biến là 2 năm. Mốc 10 năm chỉ áp dụng cho các phần kết cấu chính của nhà ở cao tầng nhằm bảo vệ quyền lợi người tiêu dùng cá nhân, không áp dụng cho hạ tầng giao thông công cộng.

Trung Quốc quy định quản lý chất lượng công trình được phân chia theo hạng mục. Tại Thượng Hải, thời hạn bảo hành cao tốc tối thiểu chỉ là 1 năm và được thỏa thuận dựa trên tính chất đặc thù của gói thầu.

Việc quy định thời gian bảo hành tối thiểu 24 tháng (đối với công trình cấp đặc biệt và cấp I) trong pháp luật Việt Nam là một "ngưỡng an toàn" phù hợp với đặc điểm kỹ thuật và thông lệ quốc tế. Nhà nước khuyến khích các bên tự nguyện thỏa thuận kéo dài thời gian bảo hành dựa trên năng lực riêng, nhưng việc luật hóa mốc 10 năm là thiếu cơ sở khoa học và không thực tiễn cho số đông.

VỀ QUẢN TRỊ RỦI RO VÀ BÀI TOÁN KINH TẾ VĨ MÔ

Thứ nhất, chi phí cơ hội và áp lực dòng tiền doanh nghiệp:

Việc kéo dài bảo hành đi kèm với việc giữ lại tiền bảo hành hoặc bảo lãnh ngân hàng sẽ tạo ra một "điểm nghẽn" vốn cực lớn cho nền kinh tế. Giả sử một dự án cao tốc có giá trị 5.000 tỷ đồng, số tiền bảo hành giữ lại (3%) là 150 tỷ đồng. Nếu bị "giam" trong 10 năm, với mức lãi suất vay trung bình 9%/năm, chi phí tài chính mà doanh nghiệp phải gánh chịu lên tới hàng trăm tỷ đồng.

Hệ quả tất yếu là, để tồn tại, các nhà thầu buộc phải tính toán rủi ro này vào giá dự thầu. Điều này trực tiếp làm tăng tổng mức đầu tư của các dự án công, gây lãng phí ngân sách nhà nước và làm giảm số lượng công trình được khởi công trong cùng một nguồn lực tài chính.

Thứ hai, cơ chế bảo đảm tài chính linh hoạt:

Hiện nay, mức tiền bảo hành tối thiểu (3 - 5% giá trị hợp đồng) là công cụ cần thiết để chủ đầu tư chủ động xử lý các sự

Chính sách pháp luật cần được xây dựng trên nền tảng các con số thống kê và thực nghiệm khoa học, đảm bảo tính bền vững cho toàn hệ thống chứ không chỉ dựa trên mô hình cá biệt của một doanh nghiệp đơn lẻ.

cố khẩn cấp. Tuy nhiên, Bộ Xây dựng nhận định rằng, đối với phần thời gian bảo hành tự nguyện tăng thêm, cần có cơ chế linh hoạt: Thay vì giữ tiền mặt, có thể áp dụng hình thức bảo lãnh của ngân hàng hoặc đặc biệt là bảo hiểm chất lượng công trình. Đây là mô hình tiên tiến giúp giải phóng vốn cho nhà thầu trong khi vẫn đảm bảo nguồn lực tài chính khắc phục sự cố thông qua bên thứ ba chuyên nghiệp.

GIÁM SÁT CỘNG ĐỒNG: TỪ HÌNH THỨC ĐẾN THỰC CHẤT TRONG KỶ NGUYÊN SỐ

Về đề xuất cắm biển công khai tên nhà thầu để người dân giám sát mang tính trực quan nhưng chưa đạt hiệu quả quản lý chuyên sâu:

Trước hết, hệ thống biển báo trên đường cao tốc phải tuân thủ nghiêm ngặt Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ (QCVN 41:2019/BGTVT). Việc cắm quá nhiều biển thông tin không liên quan đến điều hướng có thể gây mất tập trung cho tài xế, tiềm ẩn nguy cơ tai nạn.

Về tính khách quan, người tham gia giao thông có thể nhận diện hư hỏng bề mặt, nhưng không thể đánh giá được nguyên nhân gốc rễ (do địa chất biến động, do xe quá tải vượt thiết kế, hay do lỗi thiết kế kỹ thuật). Vì thế, việc giám sát này có thể tạo một sự đánh giá cảm tính, có thể làm tổn hại uy tín thương hiệu của doanh nghiệp một cách thiếu căn cứ pháp lý.

Theo Bộ Xây dựng, thay vì cắm các tấm biển vật lý có thể han gỉ theo thời gian, việc giám sát có thể thực hiện theo hướng: Công khai lịch sử năng lực, chất lượng và trách nhiệm bảo hành của tất cả các nhà thầu trên môi trường số; Sử dụng mã QR tại các điểm dừng nghỉ hoặc các ứng dụng quản lý đường bộ để người dân phản ánh thông tin. Các phản ánh này sẽ được các cơ quan chuyên môn (Cục Giám định nhà nước về chất lượng công trình xây dựng, Cục Đường bộ Việt Nam…) tiếp nhận, thẩm định và quy trách nhiệm một cách khoa học trước khi công bố rộng rãi.

VÌ SỰ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG CỦA HẠ TẦNG QUỐC GIA

Rõ ràng, việc duy trì khung pháp lý hiện hành về bảo hành công trình giao thông là cần thiết, đồng thời định hướng những bước đi mới cho quản trị hạ tầng trong kỷ nguyên số. Qua đó, vấn đề bảo hành công trình giao thông được định vị rõ nét qua các nội dung sau:

Duy trì sự ổn định của hệ thống pháp luật: Khung thời gian bảo hành tối thiểu hiện hành là kết quả của quá trình nghiên cứu kỹ lưỡng về chu kỳ kỹ thuật và kinh tế. Không nên thay đổi quy định chung để đáp ứng mô hình cá biệt của một vài doanh nghiệp, nhằm tránh gây xáo trộn và bất bình đẳng trong thị trường xây dựng.

Tôn trọng quyền tự thỏa thuận: Nhà nước hoan nghênh và tạo điều kiện cho các nhà thầu có năng lực cam kết bảo hành dài hạn. Điều này nên được cụ thể hóa bằng các điều khoản riêng biệt trong hợp đồng xây dựng giữa chủ đầu tư và nhà thầu, kèm theo cơ chế giải phóng tiền bảo hành linh hoạt sau thời gian bắt buộc.

Hoàn thiện công tác quản lý kỹ thuật: Cần tách bạch rõ ràng trách nhiệm vận hành, bảo trì định kỳ của Nhà nước và trách nhiệm bảo hành của nhà thầu. Việc siết chặt chất lượng phải thực hiện ngay từ khâu thiết kế, khảo sát và giám sát thi công thực tế, thay vì chỉ trông chờ vào việc kéo dài thời hạn bảo hành.

Minh bạch hóa bằng công nghệ: Chuyển dịch mạnh mẽ sang quản trị chất lượng dựa trên dữ liệu. Uy tín của một nhà thầu phải được xây dựng dựa trên các chỉ số định lượng về độ bền công trình và trách nhiệm xử lý sự cố được lưu trữ vĩnh viễn trên hệ thống quốc gia.

Chính sách pháp luật cần được xây dựng trên nền tảng các con số thống kê và thực nghiệm khoa học, đảm bảo tính bền vững cho toàn hệ thống chứ không chỉ dựa trên mô hình cá biệt của một doanh nghiệp đơn lẻ. Việc nâng cao chất lượng công trình giao thông là một hành trình đòi hỏi sự đồng bộ giữa đạo đức nghề nghiệp của doanh nghiệp và khoa học, nghiêm minh trong quản lý của Nhà nước. Sự kết hợp giữa cam kết tự nguyện của nhà thầu và khung pháp lý linh hoạt, chặt chẽ chính là giải pháp tối ưu cho phát triển bền vững của hạ tầng quốc gia.

Điều chỉnh hợp đồng xây dựng khi giá vật liệu biến động **phải theo từng trường hợp**

THANH NGA

Giá xăng dầu, vật liệu xây dựng biến động mạnh trong khi nhiều dự án lớn cùng triển khai, tạo áp lực lên hợp đồng trọn gói và hợp đồng theo đơn giá cố định. Trước thực tế này, việc điều chỉnh hợp đồng cần được xem xét theo từng trường hợp cụ thể trên cơ sở dữ liệu, điều kiện pháp lý và hồ sơ đánh giá.

BIẾN ĐỘNG GIÁ KHÔNG CÒN LÀ RỦI RO ĐƠN NHẤT

Khi nhu cầu thi công tăng đồng thời, thị trường xây dựng có thể xuất hiện tình trạng cạnh tranh nguồn lực giữa các dự án. Giá vật liệu, nhân công, chi phí vận chuyển, chi phí huy động thiết bị không còn là biến động riêng lẻ của từng gói thầu, mà có thể trở thành áp lực chi phí mang tính hệ thống.

Trường hợp Cảng hàng không quốc tế Long Thành là một ví dụ đáng chú ý. Dự án có tổng mức đầu tư gần 337.000 tỷ đồng, khởi công đầu năm 2021, dự kiến hoàn thành cuối năm 2026. Tuy nhiên, đến giữa tháng 4/2026, tổng số nhân sự thi công mới đạt khoảng 8.457 người, tương đương 60% nhu cầu, trong khi kế hoạch cần khoảng 14.000 người.

Riêng gói thầu 5.10 - nhà ga hành khách, lực lượng lao động từng duy trì khoảng 5.300 người/ngày trước ngày 26/01, sau đó giảm xuống còn 1.500 người, hiện tăng lên khoảng 3.400 người nhưng vẫn thấp hơn nhu cầu khoảng 6.000 người.

Theo Tổng công ty Cảng Hàng không, nguồn lao động tại dự án đang bị cạnh tranh mạnh từ các dự án hạ tầng lớn trong khu vực như: cao tốc Biên Hòa - Vũng Tàu, mở rộng cao tốc TP.HCM - Long Thành; cùng với điều kiện làm việc nắng nóng, nhiều bụi tại công trường khiến việc thu hút và giữ chân lao động gặp khó khăn.

Những con số này cho thấy, thiếu hụt nguồn lực không chỉ ảnh hưởng đến tiến độ thi công, mà còn tác động đến chi phí thực hiện hợp đồng. Khi lao động khan hiếm, vật liệu bị cạnh tranh, thiết bị thi công phải phân bổ giữa nhiều dự án, giá đầu vào có xu hướng biến động mạnh hơn. Trong bối cảnh đó, hợp đồng xây dựng, nhất là hợp đồng trọn gói và hợp đồng theo đơn giá cố định, đứng trước áp lực lớn hơn so với giả định ban đầu tại thời điểm ký kết.

Các chuyên gia cho rằng, biến động giá và thiếu hụt nguồn lực cần được nhìn nhận đúng bản chất. Đây không chỉ là khó khăn riêng của nhà thầu, cũng không chỉ là vấn đề của một dự án cụ thể. Khi nhiều dự án trọng điểm cùng bước vào giai đoạn cao điểm thi công, sức ép về vật liệu, nhân công, thiết bị và năng lực nhà thầu có thể lan rộng, tác động đến tiến độ, chi phí, giải ngân và hiệu quả đầu tư.

Tuy nhiên, từ áp lực thực tế đến điều chỉnh hợp đồng là một quá trình phải được xem xét thận trọng. Giá vật liệu tăng, nhân công thiếu, thiết bị khó huy động là những yếu tố cần được đánh giá, nhưng không thể tự động trở thành căn cứ điều chỉnh giá hợp đồng. Đây là điểm cần phân định rõ, tránh xử lý theo cảm tính, bảo đảm việc chia sẻ rủi ro, nếu có, phải dựa trên điều kiện pháp lý và dữ liệu cụ thể.

CẢNH BÁO VỀ RỦI RO NGUỒN LỰC VÀ RỦI RO PHÁP LÝ

Từ thực tế triển khai các dự án lớn, PGS.TS Nguyễn Thế Quân - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho rằng, những gì đang diễn ra tại Long Thành có thể được xem là một "phép thử sức chịu tải của hệ thống" đối với năng lực quản trị nguồn lực của Việt Nam.

Theo PGS.TS Nguyễn Thế Quân, vấn đề không chỉ nằm ở một dự án đơn lẻ, mà phản ánh 3 thiếu hụt lớn: (i) thiếu điều phối tiến độ liên dự án; (ii) thiếu cơ chế ưu tiên nguồn lực ở cấp quốc gia; (iii) và thiếu hệ thống theo dõi nguồn lực theo thời gian thực.

Cảnh báo này cho thấy, khi nhiều dự án lớn cùng triển khai, thị trường xây dựng có thể rơi vào tình trạng tự cạnh tranh nguồn lực. Các dự án cùng cần lao động kỹ thuật, VLXD, máy móc, thiết bị, tư vấn, nhà thầu và năng lực quản lý trong cùng một giai đoạn. Nếu thiếu dự báo và điều phối, sức ép nguồn lực có thể làm tăng chi phí, ảnh hưởng tiến độ và phát sinh tranh chấp trong quá trình thực hiện hợp đồng.

PGS.TS Nguyễn Thế Quân bày tỏ quan điểm: Nếu để các dự án tự cạnh tranh nguồn lực trên thị trường, hệ quả có thể là thiếu hụt lao động cục bộ nhưng lan rộng, chi phí tăng khó kiểm soát, mất cân đối phân bổ nguồn lực giữa khu vực công - tư và rủi ro chậm tiến độ mang tính hệ thống.

Điểm khó không chỉ nằm ở việc giá tăng bao nhiêu, mà

ở chỗ xác định phần biến động nào thuộc rủi ro thương mại thông thường của nhà thầu, phần nào phát sinh từ hoàn cảnh khách quan vượt khỏi khả năng dự báo tại thời điểm ký hợp đồng. Nếu thiếu dữ liệu giá, thiếu chỉ số giá đáng tin cậy, thiếu phương pháp xác định phạm vi tác động, việc điều chỉnh hợp đồng rất dễ rơi vào hai trạng thái: (i) hoặc chậm xử lý do lo ngại trách nhiệm, (ii) hoặc xử lý nhưng hồ sơ không đủ sức bảo vệ quyết định.

Vì vậy, điều chỉnh hợp đồng không thể chỉ dựa trên phản ánh khó khăn chung hoặc áp lực tiến độ. Mỗi quyết định điều chỉnh phải có hồ sơ chứng minh: (i) biến động giá xảy ra sau thời điểm ký hợp đồng; (ii) mức độ biến động ảnh hưởng trực tiếp đến phần khối lượng còn lại; (iii) nhà thầu đã áp dụng các biện pháp cần thiết trong khả năng cho phép; (iv) và việc không sửa đổi hợp đồng có thể gây thiệt hại nghiêm trọng hoặc ảnh hưởng đến khả năng tiếp tục thực hiện hợp đồng.

BỘ XÂY DỰNG HƯỚNG DẪN XỬ LÝ THEO TỪNG HỢP ĐỒNG CỤ THỂ

Trước biến động giá xăng dầu, VLXD, Bộ Xây dựng đã có Văn bản số 6761/BXD-KTQLXD ngày 08/5/2026, hướng dẫn các Bộ, ngành, địa phương về việc điều chỉnh hợp đồng xây dựng, trong đó không đặt ra cơ chế điều chỉnh đại trà, mà yêu cầu việc xử lý phải dựa trên từng hợp đồng, từng điều kiện thực hiện và từng căn cứ pháp lý cụ thể.

Thứ trưởng Bùi Xuân Dũng chỉ đạo: Việc điều chỉnh hợp đồng trong khuôn khổ pháp luật về bất khả kháng và hoàn cảnh thay đổi cơ bản. Theo Bộ luật Dân sự 2015, sự kiện bất khả kháng phải đáp ứng đủ 3 điều kiện: (i) xảy ra khách quan; (ii) không thể lường trước; (iii) và không thể khắc phục được mặc dù đã áp dụng mọi biện pháp cần thiết trong khả năng cho phép.

Đối với hoàn cảnh thay đổi cơ bản, pháp luật quy định 5 điều kiện, trong đó có (i) yêu cầu sự thay đổi do nguyên nhân khách quan xảy ra sau khi giao kết hợp đồng; (ii) tại thời điểm giao kết, các bên không thể lường trước; (iii) hoàn cảnh thay đổi lớn đến mức nếu biết trước thì hợp đồng đã không được giao kết hoặc được giao kết với nội dung hoàn toàn khác; (iv) việc tiếp tục thực hiện hợp đồng mà không thay đổi nội dung sẽ gây thiệt hại nghiêm trọng cho một bên; (v) và bên bị ảnh hưởng đã áp dụng mọi biện pháp cần thiết nhưng không thể ngăn chặn, giảm thiểu mức độ ảnh hưởng.

Đối với hợp đồng trọn gói và hợp đồng theo đơn giá cố định, Thứ trưởng Bùi Xuân Dũng nêu rõ: Chỉ được điều chỉnh đơn giá trong trường hợp bất khả kháng theo quy định pháp luật về xây dựng và hợp đồng xây dựng. Hợp đồng xây dựng cũng có thể được sửa đổi trong trường hợp hoàn cảnh thực hiện hợp đồng có thay đổi cơ bản theo quy định của Luật Đấu thầu và Bộ luật Dân sự.

Cách hướng dẫn này cho thấy rõ nguyên tắc xử lý, biến động giá là yếu tố cần được xem xét, nhưng việc điều chỉnh hợp đồng phải đặt trong điều kiện pháp lý cụ thể, không tách khỏi bản chất của từng loại hợp đồng. Hợp đồng trọn gói và hợp đồng theo đơn giá cố định vốn được thiết kế để kiểm soát rủi ro chi phí. Các rủi ro dự kiến trước đã được tính vào giá trọn gói (đối với hợp đồng trọn gói) và các rủi ro về giá đã được tính vào đơn giá (đối với hợp đồng theo đơn giá cố định). Vì vậy, nếu mọi biến động giá đều được điều chỉnh, kỷ luật hợp đồng sẽ bị suy yếu; nhưng nếu không xem xét trong những trường hợp biến động vượt khỏi khả năng dự báo và đáp ứng điều kiện pháp luật, dự án có thể bị ảnh hưởng tiến độ, phát sinh tranh chấp và làm tăng chi phí gián tiếp.

Thứ trưởng Bùi Xuân Dũng cũng yêu cầu chủ đầu tư phải làm việc với nhà thầu để phân tích, đánh giá tác động của biến động giá đối với điều kiện, tính chất, công việc cụ thể của từng hợp đồng. Các yếu tố cần xem xét gồm: (i) thời điểm ký kết hợp đồng; (ii) khối lượng đã triển khai; (iii) các biện pháp đã áp dụng trong khả năng cho phép của bên nhận thầu. Từ đó, đối chiếu với điều kiện pháp luật để xác định sự kiện này có được coi là bất khả kháng hoặc hoàn cảnh thay đổi cơ bản hay không.

Đây là yêu cầu quan trọng, bởi mỗi hợp đồng có cấu trúc chi phí, thời điểm ký kết, loại vật liệu chủ yếu, khối lượng còn lại và mức độ chịu tác động khác nhau. Một hợp đồng ký trước khi giá vật liệu tăng mạnh, còn phần lớn khối lượng chưa thi công, sẽ khác với hợp đồng ký sau khi mặt bằng giá mới đã hình thành. Một gói thầu có tỷ trọng vật liệu lớn sẽ khác với gói thầu chủ yếu là tư vấn, thiết bị hoặc lắp đặt. Một nhà thầu đã chứng minh được nỗ lực giảm thiểu thiệt hại sẽ khác với trường hợp chưa có đủ hồ sơ chứng minh.

Để việc đánh giá có cơ sở, Bộ Xây dựng yêu cầu nghiên cứu kỹ mức độ biến động giá xăng dầu, VLXD để lựa chọn phương pháp điều chỉnh giá, cơ sở dữ liệu đầu vào, nguồn thông tin về giá, nguồn chỉ số giá, phạm vi điều chỉnh và yếu tố điều chỉnh.

Như vậy, điều chỉnh hợp đồng, nếu có, phải được chứng minh bằng dữ liệu cụ thể, phương pháp cụ thể và phạm vi cụ thể.

Việc sửa đổi hợp đồng trong trường hợp bất khả kháng hoặc hoàn cảnh thay đổi cơ bản cũng phải bảo đảm không thay đổi mục tiêu, quy mô đầu tư, không vượt tổng mức đầu tư đã được phê duyệt hoặc phê duyệt điều chỉnh, bảo đảm hiệu quả đầu tư của dự án, tránh thất thoát, lãng phí. Nội dung sửa đổi có thể bao gồm: loại hợp đồng, hình thức giá hợp đồng, phương pháp điều chỉnh giá, nguồn dữ liệu để điều chỉnh giá hợp đồng và các nội dung liên quan…

Ở góc độ quản trị rủi ro, điều cần tính không chỉ là chi phí điều chỉnh hợp đồng, mà còn là chi phí nếu hợp đồng bị đứt gãy. Khi rủi ro vượt quá ngưỡng nhà thầu có thể gánh chịu, việc nhà thầu dừng thực hiện có thể khiến chủ đầu tư phải đánh giá lại khối lượng đã làm, lựa chọn nhà thầu mới, xử lý lại điều kiện giá, tiến độ, chất lượng và trách nhiệm hợp đồng. Trong nhiều trường hợp, chi phí thay thế nhà thầu có thể lớn hơn chi phí chia sẻ một phần rủi ro có điều kiện để nhà thầu đủ năng lực tiếp tục thực hiện.

Vì vậy, tinh thần xử lý không phải là điều chỉnh đại trà hay nới lỏng kiểm soát chi phí, mà là nhận diện đúng trường hợp cần chia sẻ rủi ro. Với nhà thầu có năng lực, đã chứng minh được nỗ lực giảm thiểu thiệt hại và chịu tác động bởi biến động khách quan vượt khỏi khả năng dự báo, việc xem xét điều chỉnh trong khuôn khổ pháp luật có thể là giải pháp bảo vệ tiến độ, chất lượng và hiệu quả đầu tư của dự án.

DỰ THẢO BỘ LUẬT HÀNG HẢI VÀ ĐƯỜNG THỦY VIỆT NAM (SỬA ĐỔI):

Tạo động lực mới cho phát triển kinh tế biển

MINH THÀNH

Với mục đích nhằm thể chế hóa chủ trương, chính sách của Đảng và Nhà nước, tiếp tục hoàn thiện cơ chế, chính sách trong lĩnh vực hàng hải, đường thủy nội địa, dự thảo Bộ luật Hàng hải và Đường thủy Việt Nam (sửa đổi) đã bổ sung nhiều quy định mới liên quan đến kết cấu hạ tầng, vận tải, giá dịch vụ...

GIẢI QUYẾT CÁC VẤN ĐỀ MỚI, VẤN ĐỀ PHÁT SINH

Dự thảo Bộ luật Hàng hải và Đường thủy Việt Nam (sửa đổi) đang được Bộ Xây dựng lấy ý kiến góp ý. Việc xây dựng dự án Bộ luật nhằm thể chế hóa chủ trương, chính sách của Đảng và Nhà nước, tiếp tục hoàn thiện cơ chế, chính sách trong lĩnh vực hàng hải, giao thông đường thủy nội địa; thực hiện cam kết của Việt Nam với cộng đồng quốc tế; thu gọn hệ thống pháp luật chuyên ngành; xử lý dứt điểm tình trạng đan xen giữa 2 lĩnh vực hàng hải và đường thủy nội địa, tạo thuận lợi cho quá trình tra cứu, áp dụng; tăng cường hiệu lực, hiệu quả công tác quản lý nhà nước lĩnh vực hàng hải, giao thông đường thủy nội địa; khắc phục những vướng mắc, bất cập; đề xuất các giải pháp để giải quyết các vấn đề mới, vấn đề phát sinh; khơi thông các điểm nghẽn, tạo ra động lực mới cho sự phát triển kinh tế - xã hội, hội nhập quốc tế, đảm bảo quốc phòng - an ninh trong kỷ nguyên mới, kỷ nguyên vươn mình của dân tộc.

Trên tinh thần đó, tại Điều 41, dự thảo Bộ luật đã sửa đổi, bổ sung và hoàn thiện theo hướng đa dạng hóa các phương thức khai thác kết cấu hạ tầng hàng hải được đầu tư bằng nguồn vốn nhà nước, thay vì chủ yếu theo hình thức cho thuê khai thác như hiện hành. Cụ thể, đã bổ sung các hình thức như giao quản lý, chuyển nhượng quyền thu phí, cho thuê quyền khai thác, chuyển nhượng có thời hạn quyền khai thác và các hình thức khác theo quy định của pháp luật, bảo đảm phù hợp với pháp luật về quản lý, sử dụng tài sản công. Đồng thời, quy định làm rõ nguyên tắc tổ chức thực hiện, trách nhiệm của các chủ thể liên quan và cơ chế quản lý đối với từng loại kết cấu hạ tầng, đặc biệt là phân định giữa hạ tầng phục vụ mục đích công cộng và hạ tầng có khả năng xã hội hóa khai thác. Việc bổ sung cơ chế xử lý đối với tài sản hình thành từ nguồn vốn hỗn hợp và tài sản được chuyển đổi công năng cũng góp phần tăng tính linh hoạt trong quản lý.

Trong khi đó, quy định về khai thác kết cấu hạ tầng đầu tư ngoài ngân sách nhà nước cũng được bổ sung nhằm hoàn thiện cơ chế quản lý, khai thác đối với kết cấu hạ tầng hàng hải, đường thủy nội địa được đầu tư ngoài ngân sách nhà nước, bảo đảm phù hợp với chủ trương xã hội hóa đầu tư hạ tầng. Dự thảo khẳng định quyền chủ động của nhà đầu tư trong lựa chọn hình thức quản lý, khai thác, đồng thời quy định rõ trách nhiệm của chủ sở hữu, đơn vị khai thác trong bảo trì, quản lý, báo cáo và thực hiện nghĩa vụ tài chính, bảo đảm quản lý nhà nước và sử dụng hiệu quả tài sản.

Đồng thời, bổ sung cơ chế chuyển đổi kết cấu hạ tầng do doanh nghiệp đầu tư (như luồng chuyên dùng, khu chuyển tải) thành hạ tầng công cộng theo quy hoạch, kèm theo việc xem xét hoàn trả một phần vốn đầu tư, nhằm khuyến khích doanh nghiệp tham gia đầu tư ban đầu và tạo điều kiện để Nhà nước tiếp nhận, khai thác phục vụ lợi ích chung khi có nhu cầu. Việc giao Chính phủ quy định chi tiết bảo đảm tính linh hoạt trong tổ chức thực hiện và phù hợp với pháp luật về đầu tư, tài chính công và tài sản công.

Cũng liên quan đến kết cấu hạ tầng, một trong những đề xuất quan trọng tại dự thảo lần này là bổ sung quy định rõ ràng về tiêu chí lựa chọn nhà đầu tư đối với các dự án cảng biển, cảng thủy nội địa có tính chất chiến lược. Các dự án thuộc diện này bao gồm: Dự án đầu tư mới tổng thể khu bến cảng thuộc cảng biển loại đặc biệt; Dự án đầu tư mới khu bến cảng container trung chuyển quốc tế và dự án đầu tư khu cảng, bến thủy nội địa đầu mối khu vực. Chính phủ sẽ là cơ quan quy định chi tiết về tiêu chí, thẩm quyền cũng như trình tự, thủ tục lựa chọn để đảm bảo tính minh bạch và hiệu quả.

Bên cạnh vấn đề lựa chọn nhà đầu tư, dự thảo Bộ luật cũng mở ra những cơ hội lớn thông qua các chính sách ưu đãi và hỗ trợ đầu tư, tập trung vào xu thế phát triển bền vững, bao gồm: chuyển đổi số, phát triển hạ tầng xanh, thích ứng với biến đổi khí hậu và giảm phát thải khí nhà kính.

Phối cảnh Cảng trung chuyển quốc tế Cần Giờ

Tháng 10/2026, trình Quốc hội xem xét, thông qua Bộ luật Hàng hải và Đường thủy Việt Nam (sửa đổi).

Theo Kế hoạch xây dựng dự án Bộ luật Hàng hải và Đường thủy Việt Nam (sửa đổi) của Bộ Xây dựng, từ tháng 6 - 7/2026: Tiếp thu giải trình ý kiến Thành viên Chính phủ đối với hồ sơ dự án Bộ luật; Hoàn thiện hồ sơ dự án Bộ luật, báo cáo Chính phủ, Thủ tướng Chính phủ trình Quốc hội; Chính phủ gửi hồ sơ dự án Bộ luật đến Ủy ban của Quốc hội được phân công chủ trì để thẩm tra; Tiếp thu, giải trình ý kiến thẩm tra và chỉnh lý hồ sơ dự án Bộ luật. Tháng 7/2026, Chính phủ trình Ủy ban Thường vụ Quốc hội, Quốc hội hồ sơ dự án Bộ luật. Từ tháng 8 đến tháng 10/2026: Nghiên cứu tiếp thu, giải trình ý kiến Đại biểu Quốc hội, các cơ quan của Quốc hội và chỉnh lý hồ sơ dự án Bộ luật. Tháng 10/2026, trình Quốc hội xem xét, thông qua.

KHẲNG ĐỊNH VỊ THẾ CẢNG BIỂN

Theo dự thảo Bộ luật, chức năng cơ bản của cảng biển được xác định là đầu mối giao thông vận tải, thực hiện chức năng tiếp nhận tàu biển, bốc dỡ, lưu giữ, trung chuyển hàng hóa, đón trả hành khách và kết nối vận tải đa phương thức. Đồng thời, cung cấp dịch vụ logistics và dịch vụ hàng hải, bao gồm lưu kho, phân phối, dịch vụ giá trị gia tăng, hoa tiêu, lai dắt, cung ứng, sửa chữa tàu biển và các dịch vụ liên quan khác; kết nối, chia sẻ dữ liệu và ứng dụng công nghệ số trong quản lý, khai thác cảng và chuỗi cung ứng.

Cảng biển cũng là trung tâm thúc đẩy phát triển công nghiệp, thương mại, khu kinh tế và hoạt động sản xuất, xuất khẩu, nhập khẩu; tạo động lực thúc đẩy du lịch, đô thị và kinh tế biển; là địa điểm thực hiện quản lý nhà nước về hải quan, kiểm dịch, biên phòng và các chức năng quản lý chuyên ngành khác; Bảo đảm quốc phòng, an ninh, an toàn hàng hải, bảo vệ môi trường và thực hiện chuyển đổi xanh trong hoạt động cảng biển theo quy định của pháp luật và điều ước quốc tế.

Theo cơ quan soạn thảo, dự thảo Bộ luật đã mở rộng và cụ thể hóa chức năng của cảng biển theo hướng phù hợp với thực tiễn phát triển hiện đại. Trong đó, bổ sung các nội dung về dịch vụ logistics, kết nối vận tải đa phương thức, ứng dụng công nghệ số và vai trò của cảng biển trong chuỗi cung ứng. Đồng thời, làm rõ chức năng của cảng biển là trung tâm phát triển kinh tế, thương mại và là địa điểm thực hiện quản lý nhà nước chuyên ngành, bảo đảm quốc phòng, an ninh, an toàn hàng hải và bảo vệ môi trường. Theo Bộ Xây dựng, việc sửa đổi này nhằm nâng cao vai trò, vị thế của cảng biển, phù hợp với định hướng phát triển kinh tế biển và hội nhập quốc tế.

Một trong những điểm đáng chú ý khác tại dự thảo Bộ luật là hình thành khung pháp lý thống nhất liên quan tới việc đầu tư, khai thác và quản lý cảng biển, cảng, bến thủy nội địa và cảng cạn... nhằm tạo nền tảng pháp lý cho phát triển mạng lưới cảng theo hướng kết nối chuỗi logistics và vận tải đa phương thức. Trong đó, chức năng của cảng cạn cũng được đề xuất mở rộng từ các hoạt động tác nghiệp container đơn thuần sang chức năng của một trung tâm logistics và điểm kết nối vận tải đa phương thức.

Đặc biệt, một trong những chính sách được đề xuất mới đáng chú ý là thể chế hoá yêu cầu chuyển đổi xanh và các cam kết quốc tế. Trong đó, bổ sung một hệ thống quy định mới liên quan tới giảm phát thải khí nhà kính, sử dụng nhiên liệu thay thế. Trong đó, việc bổ sung và luật hóa những thuật ngữ mới về cảng xanh, cảng thông minh và nhiên liệu thay thế giúp thống nhất cách hiểu, tạo nền tảng để xây dựng tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật, cơ chế ưu đãi và các chính sách hỗ trợ liên quan, đặc biệt trong phát triển hạ tầng, đội tàu và công nghiệp phụ trợ.

Đồng thời, đáp ứng yêu cầu hội nhập và thực hiện các cam kết và điều ước quốc tế khi các nội dung liên quan đến giảm phát thải khí nhà kính, sử dụng năng lượng sạch, điện bờ, nhiên liệu thay thế… đều là yêu cầu bắt buộc trong các điều ước quốc tế, cũng bảo đảm tính định hướng và lâu dài của hệ thống pháp luật.❖

Sông Hồng trong không gian Hà Nội mới

KTS PHẠM THANH TÙNG*

Câu chuyện về sông Hồng trong Quy hoạch Hà Nội xuyên thế kỷ không chỉ là câu chuyện kỹ thuật về môi trường, về phòng chống lũ… mà đó còn là chuyện của bản sắc, của văn hóa, văn minh và cả tâm linh chứa đựng trong sông Mẹ vĩ đại. Việc đưa sông Hồng trở lại vị trí trung tâm - như một thực thể sống - sẽ là chìa khóa để giải quyết đồng thời ba bài toán: môi trường, không gian và bản sắc đô thị.

TỪ "VÙNG BIÊN" ĐẾN "MẶT TIỀN" HÀ NỘI

Ngàn năm qua, sông Hồng luôn được ví như "mạch máu" và trục xương sống trong lịch sử hình thành Thăng Long - Hà Nội. Trong các bản quy hoạch từ thời Pháp thuộc đến Quy hoạch Thủ đô thời kỳ 2021 - 2030 tầm nhìn 2050, hay Quy hoạch tầm nhìn 2065 và đặc biệt nay là Quy hoạch tổng thể Thủ đô Hà Nội tầm nhìn 100 năm, vai trò của sông Hồng đã có sự chuyển dịch mạnh mẽ từ một "vùng biên" phía sau thành phố trở thành trục cảnh quan trung tâm hội tụ các giá trị di sản văn hóa lịch sử và hiện đại, là không gian công cộng khổng lồ với các công viên, quảng trường và khu vui chơi giải trí, giúp điều hòa khí hậu và tạo ra bản sắc riêng cho đô thị Hà Nội trong kỷ nguyên phát triển mới.

Đây là cơ hội để chúng ta trả lại vị thế vĩ đại của sông Hồng, dòng sông Mẹ linh thiêng đã ngàn vạn năm cần mẫn chở phù sa bồi đắp tạo nên vùng đồng bằng châu thổ Bắc Bộ, cái nôi của nền văn minh lúa nước, văn minh sông Hồng, nơi khởi nguồn của lối sống định canh, định cư tạo nên Làng Việt và văn hóa Làng truyền thống, nơi nuôi dưỡng nền văn hóa Việt Nam.

Là cơ hội để Hà Nội tái cấu trúc lại không gian đô thị đôi bờ sông Hồng, dọn dẹp những "thứ rác kiến trúc" lộn xộn, nhếch nhác tồn tại từ nhiều thập niên ngoài bãi sông, ven sông làm xấu cảnh quan đô thị, làm cản trở dòng chảy, làm ô nhiễm sông Hồng và sự phát triển của Thành phố.

Với tư tưởng chủ đạo của Đồ án Quy hoạch tổng thể Thủ đô Hà Nội tầm nhìn 100 năm (Quy hoạch) vừa được HĐND Thành phố thông qua, Hà Nội sẽ phát triển ổn định theo không gian phát triển mở và động với cấu trúc đô thị "đa tầng, đa lớp, đa cực, đa trung tâm", và Trục đại lộ cảnh quan sông Hồng không chỉ đơn thuần là một tuyến đường giao thông, mà được định vị là "Trục di sản, trục cảnh quan và động lực phát triển" quan trọng nhất trong cấu trúc không gian của Thủ đô Hà Nội với tầm nhìn xuyên thế kỷ.

Với việc xác định sông Hồng là trục cảnh quan chủ đạo giúp Hà Nội thoát khỏi mô hình "vết dầu loang" đơn cực, chuyển sang mô hình đô thị đa cực, hiện đại, xanh và bền vững. Và như thế, sông Hồng không chỉ là lá phổi xanh, không gian thích ứng sinh thái của Thành phố, mà có các vai trò chiến lược được xác định đó là: trở thành Trục trung tâm hội tụ của "Thành phố hai bên sông", trung tâm của cấu trúc đô thị đối xứng, lấy dòng sông làm "mặt tiền". Trục cảnh quan này kết nối khu vực nội đô lịch sử (Hoàn Kiếm, Ba Đình...) với các trung tâm mới ở phía Bắc (Đông Anh, Mê Linh). Đại lộ ven sông sẽ liên kết các đô thị vệ tinh và các tỉnh lân cận, tạo thành một dải hành lang kinh tế - đô thị xuyên suốt.

Đây còn là hành lang di sản và văn hóa ngàn năm, bởi nó kết nối các điểm di sản như đình chùa, các di tích lịch sử; các làng nghề truyền thống dọc hai bờ sông, tạo ra các không gian lễ hội văn hóa và du lịch tâm linh. Cùng với đó, các công trình kiến trúc hiện đại, nhà hát, trung tâm triển lãm, công viên sinh thái… sẽ được bố trí dọc đại lộ này, tạo nên hình ảnh một Thủ đô năng động, sáng tạo, hiện đại nhưng vẫn giữ được bản sắc văn hóa. Và cuối cùng, Trục đại lộ cảnh quan sông Hồng phải là động lực phát triển kinh tế dịch vụ và du lịch, với các trung tâm tài chính, thương mại và dịch vụ cao cấp ven sông; kích hoạt giá trị kinh tế của đất đai và mặt nước biến sông Hồng thành con đường du lịch quốc tế, kết nối Hà Nội với các vùng di sản phía hạ lưu và thượng lưu.

Thế nhưng, đây là quyết tâm, ý chí đặt ra trong Quy hoạch, còn để biến dòng sông Hồng trở thành Trục đại lộ cảnh quan - văn hóa với những hình ảnh kiến trúc, cảnh quan, không gian vui chơi giải trí hiện đại, lung linh, đầy sắc màu được tạo ra bởi công nghệ số thì lại là câu chuyện khác, đòi hỏi những giải pháp thiết thực, cụ thể với tư tưởng "thuận thiên", "lấy con người làm trung tâm" dựa trên các cơ sở khoa học về cấu trúc địa tầng, địa mạo, thủy văn, lưu lượng dòng chảy phức tạp của sông Hồng và cộng đồng cư dân đông đúc ven sông, ngoài bãi…

"QUYỀN CỦA SÔNG" TRONG TRỤC ĐẠI LỘ CẢNH QUAN SÔNG HỒNG

Việc "đánh thức" sông Hồng không hề đơn giản do những đặc thù về tự nhiên và lịch sử định cư.

Trị thủy và an toàn thoát lũ. Đây là vấn đề ưu tiên số một. Sông Hồng có chế độ thủy văn phức tạp. Việc xây dựng bất cứ

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

công trình nào ở bãi sông cũng phải tuân thủ nghiêm ngặt Quy hoạch phòng chống lũ; Phải đảm bảo không gian thoát lũ an toàn tuyệt đối cho nội đô khi có biến đổi khí hậu cực đoan, đồng thời vẫn khai thác được quỹ đất bãi sông.

Biến đổi dòng chảy và sạt lở. Trong những năm gần đây, mực nước sông Hồng xuống thấp kỷ lục vào mùa khô, gây khó khăn cho canh tác và giao thông thủy. Sự thay đổi dòng chảy cũng dẫn đến nguy cơ sạt lở bờ sông tại nhiều khu vực, đe dọa các khu dân cư hiện hữu.

Quản lý dân cư và trật tự xây dựng bãi sông. Hiện trạng dân cư sinh sống tại các khu vực ngoài đê (như Phúc Tân, Chương Dương, Phúc Xá...) rất dày đặc và phức tạp về mặt pháp lý, vì thế cần có giải pháp cụ thể để tái thiết đô thị, di dời hoặc chỉnh trang các khu dân cư này đảm bảo sinh kế cho người dân mà vẫn tạo ra không gian công cộng thông thoáng là một bài toán xã hội nan giải.

Ô nhiễm môi trường và hệ sinh thái. Việc xây dựng, khai thác cát bừa bãi, xả rác, nước thải chưa qua xử lý từ các khu dân cư và làng nghề ven sông tồn tại hàng thập niên qua đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến hệ sinh thái sông Hồng, vì thế phục hồi hệ sinh thái sông Hồng, trả lại môi trường nước sạch, đảm bảo an ninh nguồn nước và các bãi bồi tự nhiên là điều kiện tiên quyết để xây dựng một "thành phố xanh" đúng nghĩa.

Đây là những vấn đề rất quan trọng, tác động đến việc thực hiện thành công Trục đại lộ cảnh quan sông Hồng như Quy hoạch đã đề ra. Câu chuyện sông Hồng cũng là câu chuyện "Quyền được chảy" của sông mà nhiều nước trên thế giới khởi xướng từ thập niên 70 của thế kỷ 20 trên nền tảng tư tưởng quan trọng của Christopher Stone (Mỹ), với bài viết nổi tiếng năm 1972 "Should Trees Have Standing?" đặt vấn đề rằng thiên nhiên (cây, sông, hệ sinh thái) có thể có quyền pháp lý. Trong bối cảnh khủng hoảng môi trường toàn cầu gia tăng (ô nhiễm nước, đập thủy điện xây tràn lan, biến đổi khí hậu làm suy kiệt hệ sinh thái sông), thì cách tiếp cận truyền thống coi sông là "tài sản" để khai thác, không có tư cách pháp lý độc lập đã trở nên lỗi thời. Sự trỗi dậy của tư duy mới trong luật học đã cho rằng thiên nhiên không chỉ là đối tượng quản lý, mà còn là "chủ thể có quyền". Và thế, đến đầu thế kỷ 21 bùng nổ phong trào "Quyền của các dòng sông" (Rights of Rivers) với các nước tiên phong như: Ecuador trở thành quốc gia đầu tiên đưa quyền của thiên nhiên trong đó có sông vào Hiến pháp (2008); New Zealand công nhận sông Whanganui River là pháp nhân (2017); Sông Atrato River được Tòa án Hiến pháp Colombia bảo vệ như một thực thể có quyền (2016 - 2019). Từ phong trào này, năm 2010 mạng lưới toàn cầu "Quyền của thiên nhiên", bao gồm cả những dòng sông (Global Alliance for the Rights of Nature) đã ra đời. Và Liên Hợp Quốc đã chọn ngày Chủ nhật cuối cùng của tháng 9 hàng năm là Ngày Sông ngòi Thế giới (World Rivers Day). Nhắc qua như vậy để thấy, việc xây dựng Trục cảnh quan sông Hồng không chỉ là yếu tố kỹ thuật của quy hoạch, mà hơn tất cả là liên quan đến hệ sinh thái sông Hồng. Áp dụng tư duy "quyền của các dòng sông" vào hệ thống sông Hồng - sông Đà không chỉ là một câu chuyện pháp lý, mà thực chất là một cách tái cấu trúc tư duy quy hoạch đô thị - vùng theo hướng sinh thái, đa trung tâm và bền vững dài hạn.

Sông là hệ sinh thái sống (Living system) có "quyền" được chảy tự nhiên, duy trì phù sa, đa dạng sinh học; Là trục cấu trúc không gian chứ không chỉ là yếu tố kỹ thuật. Điều này đặc biệt quan trọng với Hà Nội - nơi sông Hồng vừa là trục lịch sử - văn hóa Thăng Long, vừa là rủi ro thiên tai lớn nhất. Sông Hồng - sông Cái không chỉ là một dòng chảy vật lý, mà còn là linh hồn của Hà Nội. Giải quyết được bài toán sông Hồng chính là chìa khóa để đưa Hà Nội trở thành một đô thị tầm cỡ quốc tế. Hiện nay, sông Hồng đang có những xung đột hiện hữu, đòi hỏi phải có sự thay đổi về tư duy quản trị. Hệ thống đê điều hùng vĩ được xây đắp từ hàng trăm năm bảo vệ trung tâm Hà thành trước các trận lũ lịch sử, nhưng cũng làm hạn chế không gian thoát lũ sông Hồng; Không gian bãi bồi bị lấn chiếm, làm suy giảm đa dạng sinh học; Khai thác cát bừa bãi có tính tận dụng, hệ thống thủy điện lớn được xây dựng tại phía thượng nguồn sông Hồng thiếu kiểm soát dẫn đến lượng phù sa bị giảm mạnh, gây sạt lở ngày càng nghiêm trọng; Đô thị hóa bãi sông dẫn đến áp lực xây dựng tại bãi sông, ven sông, bãi giữa làm tăng nguy cơ phá vỡ "không gian thở" của dòng sông và cản trở dòng chảy. Sông bị chia cắt theo địa giới hành chính và ngành (nông nghiệp, xây dựng, tài nguyên), thiếu một cơ chế quản trị tích hợp theo lưu vực.

Vì thế, để Trục đại lộ cảnh quan sông Hồng trở thành hiện thực, rất cần giải quyết những vấn đề cơ bản sau:

1. Thiết lập "hành lang quyền của sông": Xác định vùng không gian tối thiểu để sông tràn lũ tự nhiên, tái tạo phù sa, duy trì hệ sinh thái. Đây là bước tương tự cách sông Whanganui River được New Zealand bảo vệ toàn diện theo lưu vực.

2. Quy hoạch đa lớp: "Sông - bãi - đô thị" với Lớp 1: Lòng sông (dòng chảy chính); Lớp 2: Bãi sông (không gian linh hoạt, ngập theo mùa); và Lớp 3: Đô thị (phát triển kiểm soát). Đây chính là cách tiếp cận phù hợp với tư duy "đa lớp - đa tầng" trong Quy hoạch Hà Nội.

3. Chuyển từ "chống lũ" sang "sống chung với lũ": Thiết kế công viên ngập nước, không gian công cộng linh hoạt theo mùa và hạ tầng "mềm" thay vì bê tông hóa toàn bộ. Mở rộng khái niệm hành lang sinh thái - văn hóa - cảnh quan, với vùng lõi (không xây dựng), vùng chuyển tiếp (không gian linh hoạt) và vùng phát triển đô thị có kiểm soát.

Nếu được như vậy, sông Hồng sẽ trở thành trục kết nối các cực phát triển hai bên sông, không còn là "ranh giới chia cắt". Tăng khả năng chống chịu biến đổi khí hậu, hấp thụ lũ tự nhiên, giảm phụ thuộc công trình đê cứng. Khôi phục bản sắc Thăng Long vốn là đô thị "bên sông" thay vì "quay lưng ra sông" như hiện nay.

VĨ THANH

Câu chuyện về sông Hồng trong Quy hoạch Hà Nội xuyên thế kỷ không chỉ là câu chuyện kỹ thuật về môi trường, về phòng chống lũ… mà đó còn là chuyện của bản sắc, của văn hóa, văn minh và cả tâm linh chứa đựng trong sông Mẹ vĩ đại. Việc đưa sông Hồng trở lại vị trí trung tâm - như một thực thể sống - sẽ là chìa khóa để giải quyết đồng thời ba bài toán: môi trường, không gian và bản sắc đô thị.

Và cuối cùng, sông Hồng chính là yếu tố quan trọng trong định hình và cấu trúc lại không gian đô thị Hà Nội tầm nhìn 100 năm để Hà Nội trở thành Thành phố "Văn hiến - Văn minh- Hiện đại - Hạnh phúc", như Nghị quyết 02 của Bộ Chính trị về "Xây dựng và phát triển Thủ đô Hà Nội trong kỷ nguyên mới" đã chỉ rõ.

Hình thành hệ thống đô thị thế hệ mới tại Việt Nam 2050 trên nền tảng an ninh xanh và khả năng chống chịu

TS.KTS TRẦN THỊ LAN ANH*

Mô hình đô thị thế hệ mới không chỉ là hướng đi tất yếu mà còn là cơ hội chiến lược để Việt Nam chuyển đổi các vùng đô thị lớn thành những siêu đô thị thế hệ mới, có khả năng cạnh tranh và có hệ sinh thái năng động, bền vững và chống chịu cao.

Trong bối cảnh toàn cầu hiện nay đang chứng kiến những biến động lớn về địa kinh tế, địa chính trị, công nghệ và khí hậu, mô hình đô thị truyền thống bộc lộ nhiều hạn chế, đặc biệt tại các đô thị lớn - nơi được coi là "đầu tàu cạnh tranh" của quốc gia. Các đô thị phát triển theo mô hình "một trung tâm chính tập trung" dẫn đến quá tải hạ tầng, ùn tắc giao thông, ô nhiễm không khí, chi phí vận hành cao và chất lượng sống thấp. Hạ tầng cũ và công nghệ hạn chế làm giảm khả năng chống chịu khí hậu, gia tăng rủi ro thiên tai, ảnh hưởng đến sản xuất, dịch vụ và sức hút đầu tư. Phần lớn các đô thị châu Á vẫn phụ thuộc vào xe cá nhân chạy xăng, hệ thống điện tập trung, tỷ lệ năng lượng tái tạo thấp, quản lý theo cách truyền thống, thiếu dữ liệu và công nghệ số, dẫn đến hiệu quả quản trị thấp và khó đáp ứng yêu cầu cạnh tranh trong xu thế kinh tế xanh toàn cầu.

Bài viết này tổng hợp các nghiên cứu về mô hình đô thị thế hệ mới trên thế giới, đặc biệt tại châu Á (30 đô thị lớn giai đoạn 2015 - 2023), để đề xuất mô hình áp dụng cho Việt Nam. Phân tích các trường hợp điển hình cho thấy: Singapore với chiến lược "Smart Nation" đã số hóa hơn 95% dịch vụ công, giúp giảm tiêu thụ năng lượng khoảng 20%; Tokyo sau thảm họa 2011 phát triển hơn 100 hệ thống micro-grid nâng cao khả năng chống chịu năng lượng; Copenhagen giảm phát thải hơn 70% so với năm 1995; Thâm Quyến và Seoul triển khai điện hóa giao thông công cộng và ứng dụng IoT giám sát hạ tầng. Từ đó, bài viết đề xuất mô hình đô thị thế hệ mới với ba trụ cột: năng lượng phân tán, ứng dụng công nghệ số và quản trị linh hoạt, có thể triển khai trước tiên tại vùng Thủ đô Hà Nội và vùng TP.HCM, sau đó mở rộng ra các đô thị trực thuộc Trung ương khác như Huế, Đà Nẵng, Hải Phòng, Cần Thơ và hệ thống đô thị trực thuộc các tỉnh.

(*) *Nguyên Phó cục trưởng Cục Phát triển đô thị (Bộ Xây dựng)*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, các cú sốc toàn cầu đã làm thay đổi căn bản cách thức vận hành của hệ thống đô thị. Khủng hoảng năng lượng giai đoạn 2020-2022 đã khiến giá năng lượng tại nhiều khu vực tăng gấp 2-3 lần và nhiều hơn, qua đó bộc lộ sự phụ thuộc lớn của đô thị vào hệ thống cung ứng tập trung [5]. Đồng thời, biến đổi khí hậu làm gia tăng tần suất và cường độ thiên tai, với thiệt hại kinh tế toàn cầu ước tính vượt 300 tỷ USD mỗi năm [15]. Các đô thị - nơi tập trung hơn 55% dân số thế giới - trở thành khu vực chịu tác động mạnh và quy mô lớn các thiệt hại rủi ro [1][2]. Nhiều quốc gia đã buộc phải chuyển đổi mô hình phát triển đô thị, điển hình như Singapore với chiến lược "Smart Nation" [12], Tokyo với hệ thống "micro-grid" sau thảm họa năm 2011 [5], hay Copenhagen với mô hình đô thị xanh giảm phát thải hơn 70% so với năm 1995 [11].

Tại Việt Nam, quá trình đô thị hóa diễn ra nhanh chóng với tỷ lệ đạt khoảng 42% năm 2023, khoảng 44% năm 2025 và dự kiến đạt trên 50% vào năm 2030 [7][10]. Tuy nhiên, sự phát triển này chưa đi kèm với mô hình hạ tầng và quản trị phù hợp. Hệ thống năng lượng vẫn phụ thuộc chủ yếu vào nguồn tập trung, giao thông đô thị gây phát thải lớn, dữ liệu còn chưa được hình thành đồng bộ và quản trị còn phân tán [6][8]. Trong bối cảnh đó, việc chuyển đổi sang mô hình "đô thị thế hệ mới hay siêu đô thị thế hệ mới" không chỉ là xu hướng toàn cầu mà còn là yêu cầu tất yếu đối với Việt Nam. Đây là mô hình phát triển hướng tới đô thị tích hợp giữa hệ thống micro-grid, công nghệ số và quản trị linh hoạt, nhằm nâng cao khả năng chống chịu và phát triển bền vững [3][4][9].

2. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ

Kinh nghiệm quốc tế cung cấp nhiều bài học quan trọng. Singapore là một trong những quốc gia tiên phong trong việc xây dựng đô thị dựa trên dữ liệu, với hơn 95% dịch vụ công

trực tuyến và mức giảm tiêu thụ năng lượng khoảng 20% [12]. Tokyo, sau thảm họa năm 2011, đã phát triển hơn 100 hệ thống micro-grid và nâng cao đáng kể khả năng chống chịu [5]. Copenhagen là hình mẫu về đô thị xanh với mức giảm phát thải hơn 70% so với năm 1995 [11]. Thâm Quyến cho thấy vai trò của chính sách trong chuyển đổi giao thông, khi điện hóa hoàn toàn hệ thống xe buýt công cộng [14]. Seoul cũng chứng minh rằng việc áp dụng IoT giám sát hạ tầng giúp giảm ùn tắc và nâng cao khả năng dự báo rủi ro [12].

Qua các báo cáo của IEA (2022), UN-Habitat (2022), World Bank (2021) và OECD (2020), dữ liệu tổng hợp từ 30 đô thị châu Á cho thấy các đô thị đạt mức chống chịu cao đều đồng thời có tỷ lệ năng lượng phân tán lớn, mức độ số hóa đô thị cao và cơ chế quản trị linh hoạt, liên ngành [1][2][5][10][11]. Cụ thể, những đô thị như Tokyo và Singapore duy trì hơn 30 - 40% năng lượng từ micro-grid và năng lượng tái tạo tại chỗ, kết hợp với hệ thống dữ liệu giao thông và năng lượng theo thời gian thực, giúp giảm thiểu rủi ro gián đoạn và tăng hiệu quả vận hành. Thâm Quyến và Seoul chứng minh rằng việc điện hóa giao thông công cộng và áp dụng IoT giám sát hạ tầng không chỉ giảm ùn tắc và phát thải mà còn nâng cao khả năng dự báo và phản ứng nhanh trước các cú sốc. Ngược lại, các đô thị phụ thuộc vào nguồn cung tập trung và thiếu nền tảng dữ liệu đồng bộ, như Jakarta hay Mumbai, dễ bị gián đoạn năng lượng và giao thông, đồng thời hiệu quả quản trị thấp hơn.

Thâm Quyến là một trong những đô thị điển hình về chuyển đổi từ mô hình truyền thống sang đô thị thế hệ mới, với nhiều bài học cụ thể cho Việt Nam [14]. Thâm Quyến tập trung: (i) Phát triển năng lượng và giao thông xanh: 100% xe buýt và taxi chạy điện, giảm mạnh khí thải và ô nhiễm; (ii) Hệ thống trạm sạc phân tán: xây dựng hàng chục nghìn trạm sạc điện khắp thành phố; (iii) Đô thị thông minh dựa trên dữ liệu: trung tâm điều hành số hóa, ứng dụng AI và IoT; (iv) Quy hoạch đa cực - đa trung tâm: Nanshan (công nghệ), Futian (tài chính), Qianhai (dịch vụ quốc tế); (v) Hệ sinh thái đổi mới sáng tạo: khu công nghệ cao, hỗ trợ mạnh mẽ khởi nghiệp và R&D; (vi) Hạ tầng chống chịu khí hậu: hệ thống thoát nước ngầm, công viên ngập nước, quy hoạch "sống chung với nước".

Một bài học khác đến từ thành phố Nam Ninh "thành phố xanh của Trung Quốc" với hệ thống 1.000 hồ và công viên, cây xanh khí hậu cận nhiệt đới. Không gian xanh chiếm tỷ lệ lớn trong quy hoạch, giúp điều hòa khí hậu và nâng cao chất lượng sống. Nam Ninh trở thành "thủ phủ xe điện" với hơn 4,8 triệu xe điện lưu thông, giải quyết hiệu quả bài toán sạc pin và đỗ xe, tạo ra hệ sinh thái giao thông xanh. Chính quyền chú trọng quy hoạch dài hạn, kết hợp công nghệ để quản lý giao thông, năng lượng và môi trường, duy trì sự hài hòa giữa phát triển kinh tế và bảo tồn sinh thái. Đây là minh chứng cho việc kết hợp không gian xanh, giao thông điện và quản lý thông minh để xây dựng đô thị bền vững.

Kinh nghiệm quốc tế cung cấp nhiều bài học quan trọng cho việc hình thành đô thị thế hệ mới tại Việt Nam. Những kinh nghiệm này cho thấy xu hướng toàn cầu đang chuyển dịch mạnh mẽ sang mô hình đô thị tự chủ và chống chịu cao, đồng thời cung cấp cơ sở lý luận và thực tiễn quan trọng để Việt Nam tham khảo trong quá trình xây dựng hệ thống đô thị thế hệ mới.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Đúc rút kinh nghiệm quốc tế cho Việt Nam

Từ kinh nghiệm quốc tế có thể rút ra 3 bài học tổng quát cho Việt Nam: Thứ nhất, sử dụng hệ thống micro-grid là nền tảng để tăng khả năng chống chịu, đặc biệt tại các đô thị lớn trung tâm vùng [5]. Thứ hai, chuyển đổi số và đô thị thông minh giúp tối ưu hóa vận hành và nâng cao khả năng dự báo, từ đó giảm thiệt hại khi xảy ra các cú sốc [11][12]. Thứ ba, quản trị linh hoạt và liên ngành là yếu tố quyết định để các chính sách và dự án đô thị có thể thích ứng kịp thời với các thay đổi kinh tế, môi trường và xã hội [10]. Các bài học quốc tế có thể được chuyển hóa thành chiến lược cụ thể cho từng vùng đô thị Việt Nam, đảm bảo tính khả thi và phù hợp với bối cảnh kinh tế - chính trị hiện nay.

Vùng Thủ đô Hà Nội: là trung tâm chính trị - hành chính và có mật độ dân số cao, đồng thời chịu áp lực từ đô thị hóa nhanh và thiên tai như lũ quét, mưa lớn và ngập lụt đô thị. Bài học từ Tokyo và Singapore gợi ý rằng Hà Nội nên phát triển hệ thống năng lượng phân tán cho các đô thị vệ tinh [5][12], kết hợp với hệ thống dữ liệu giao thông và năng lượng theo thời gian thực để dự đoán nhu cầu và điều phối nguồn lực kịp thời. Việc số hóa các dịch vụ công và quản lý cơ sở hạ tầng thông qua AI sẽ giúp nâng cao hiệu quả vận hành [11], đồng thời cơ chế quản trị liên ngành giữa các sở, ban, ngành và địa phương sẽ tăng khả năng phản ứng nhanh với các cú sốc [10].

Vùng TP.HCM: là trung tâm kinh tế - thương mại của Việt Nam, với mật độ dân cư cao và áp lực giao thông lớn. Bài học từ Thâm Quyến và Seoul cho thấy tầm quan trọng của điện hóa giao thông công cộng và tích hợp IoT trong quản lý giao thông [12][14]. TP.HCM có thể phát triển các trung tâm đổi mới sáng tạo, thử nghiệm các mô hình xe điện và "Xe kết nối lưới điện" (Vehicle-to-Grid - V2G); đồng thời triển khai hệ thống dữ liệu số hóa để giám sát và tối ưu hóa lưu lượng giao thông, tiêu thụ năng lượng và phát thải khí CO_2. Cơ chế quản trị linh hoạt cho phép điều chỉnh chính sách năng lượng và giao thông theo thời gian thực, giúp giảm rủi ro tắc nghẽn và gián đoạn dịch vụ [10].

Các đô thị trực thuộc Trung ương (Đà Nẵng, Hải Phòng, Cần Thơ): Có quy mô nhỏ hơn nhưng là đầu mối logistics, cảng biển và đô thị sinh thái. Cụ thể: Đà Nẵng: Áp dụng mô hình đô thị xanh, tích hợp năng lượng tái tạo và hạ tầng sinh thái, xây dựng micro-grid tại khu công nghiệp và khu dân cư [11]. Hải Phòng: Phát triển hệ thống chuỗi cung ứng an toàn, đa dạng nguồn năng lượng và khoáng sản chiến lược, kết hợp quản lý dữ liệu để tối ưu hóa vận hành cảng và mạng lưới giao thông [10]. Cần Thơ: Áp dụng quy hoạch sinh thái và năng lượng mặt trời nổi trên sông, kết hợp quản trị dữ liệu để dự báo mực nước, hạn chế rủi ro lũ lụt và cải thiện chất lượng sống [9].

Đối với các đô thị thuộc tỉnh, việc triển khai đồng bộ 3 trụ cột năng lượng phân tán, công nghệ số và quản trị linh hoạt là cần thiết. Tuy nhiên, cách tiếp cận phải linh hoạt theo đặc thù kinh tế, địa lý và chức năng đô thị [7][8][9]: (i) Vùng trung du và miền núi phía Bắc. Đặc thù: Có nhiều cửa khẩu quốc tế, lối mở biên

giới, gắn với mô hình kinh tế biên mậu. Định hướng: Phát triển hệ thống năng lượng phân tán dựa trên thủy điện nhỏ, điện mặt trời mái nhà, kết hợp lưu trữ năng lượng cộng đồng. Ứng dụng IoT và dữ liệu số để quản lý logistics biên mậu, giám sát giao thông cửa khẩu và dự báo nhu cầu năng lượng. Quản trị liên ngành giữa thương mại - hải quan - giao thông - năng lượng để đảm bảo chuỗi cung ứng ổn định, chống chịu trước biến động kinh tế và khí hậu; (ii) Vùng ven biển và hải đảo. Đặc thù: Tập trung nhiều khu kinh tế mở, gắn với chiến lược phát triển biển và cảng biển quốc gia. Định hướng: Phát triển điện gió ven biển, điện mặt trời nổi và hệ thống micro-grid tại các khu kinh tế, cảng biển. Ứng dụng công nghệ số để quản lý logistics, giám sát cảng biển, và tối ưu hóa vận hành chuỗi cung ứng. Quản trị linh hoạt: Kết nối chính quyền địa phương với doanh nghiệp cảng biển, khu công nghiệp và cộng đồng dân cư; xây dựng cơ chế phản ứng nhanh trước thiên tai (bão, nước biển dâng). Tích hợp hạ tầng sinh thái: rừng ngập mặn, công viên ven biển, hành lang thoát nước để giảm thiểu rủi ro ngập lụt và bảo vệ môi trường.

Việc thí điểm các mô hình này tại các vùng đô thị lớn và vùng đô thị thuộc tỉnh sẽ giúp Việt Nam xây dựng hệ thống đô thị thế hệ mới, vừa đảm bảo phát triển bền vững, vừa nâng cao khả năng chống chịu trước các cú sốc kinh tế, thiên tai và biến đổi khí hậu [15].

3.2. Tính khả thi để hình thành hệ thống đô thị thế hệ mới tại Việt Nam

Việt Nam hiện có nhiều điều kiện thuận lợi để triển khai mô hình đô thị thế hệ mới. Tốc độ tăng trưởng kinh tế ổn định, môi trường chính trị vững chắc và các cam kết quốc tế về phát triển bền vững là những yếu tố hỗ trợ quan trọng [1][2]. Mô hình chính quyền 2 cấp cùng với các quy định mới về việc hình thành vùng đô thị trực thuộc tỉnh và thành phố trực thuộc Trung ương (gồm các cụm phường, xã, thị trấn) cho thấy xu hướng mở rộng phạm vi đô thị và phát triển đô thị phân tán - đa cực, đa trung tâm. Đây là điều kiện thuận lợi để áp dụng mô hình ba trụ cột: năng lượng phân tán, công nghệ số và quản trị linh hoạt [5][10][11].

Tuy nhiên, vẫn tồn tại những thách thức lớn: Thiếu khung pháp lý cho năng lượng phân tán: hiện chưa có quy định rõ ràng về micro-grid, cơ chế mua bán điện trực tiếp (DPPA) và quyền tự chủ năng lượng của cộng đồng [5]. Hạn chế về nguồn vốn: đầu tư cho hạ tầng số, năng lượng tái tạo và công trình chống chịu khí hậu đòi hỏi nguồn lực tài chính lớn, trong khi cơ chế tài chính xanh mới ở giai đoạn khởi đầu [7][9]. Thiếu nhân lực chất lượng cao: chuyển đổi số và quản trị đô thị thông minh cần đội ngũ chuyên gia công nghệ, dữ liệu và quản lý liên ngành, nhưng nguồn nhân lực hiện còn hạn chế [11][12]. Quản trị đô thị còn yếu: sự phối hợp liên ngành và liên vùng chưa hiệu quả, dẫn đến khó khăn trong triển khai chính sách đồng bộ [10]. Do đó, việc triển khai cần được thực hiện theo lộ trình từng bước: Ngắn hạn (2025 - 2030): thí điểm tại các đô thị lớn như Hà Nội và TP.HCM, tập trung vào năng lượng phân tán và trung tâm điều hành đô thị thông minh; Trung hạn (2030 - 2040): mở rộng ra các đô thị trực thuộc Trung ương (Đà Nẵng, Huế Hải Phòng, Cần Thơ), kết hợp năng lượng tái tạo, quản trị dữ liệu và hạ tầng chống chịu khí hậu; Dài hạn (2040 - 2050): nhân rộng mô hình cho các đô thị thuộc tỉnh, hình thành mạng lưới đô thị thế hệ mới toàn quốc, đảm bảo phát triển bền vững và nâng cao khả năng chống chịu trước biến đổi khí hậu [15].

3.3. Các hoạt động cần thực hiện

Để hình thành hệ thống đô thị thế hệ mới trên nền tảng năng lượng phân tán, công nghệ số và quản trị linh hoạt, Việt Nam cần triển khai đồng bộ nhiều hoạt động từ quy hoạch, hạ tầng, công nghệ đến chính sách.

3.3.1. Quy hoạch đô thị: (i) Tổ chức không gian đô thị phân tán - xanh - thông minh: Phát triển theo hướng đa cực - đa trung tâm, không tập trung toàn bộ vào một khu trung tâm duy nhất (như nội đô lịch sử hiện nay); Hình thành nhiều trung tâm chức năng: tài chính, công nghệ, văn hóa, sinh thái, logistics phát triển nhằm giảm tải hạ tầng, phân tán dân cư và hoạt động kinh tế [10][12][14]; (ii) Không gian xanh và hành lang sinh thái: Quy hoạch công viên, hồ điều hòa, hành lang ven sông để vừa là không gian công cộng, vừa chống ngập và điều hòa khí hậu. Tích hợp mô hình "công viên ngập nước" như Rotterdam để kết hợp giải trí và chống chịu khí hậu [11]; (iii) Kết nối giao thông công cộng và năng lượng phân tán: Quy hoạch hệ thống giao thông công cộng bằng đường sắt tốc độ cao (cân nhắc yếu tố kinh tế) hoặc xe buýt điện gắn với các trung tâm mới; Tích hợp trạm sạc xe điện và hệ thống năng lượng phân tán ngay trong không gian đô thị [5][14]; (iii) Phân tán dịch vụ thiết yếu: Quy hoạch các trung tâm dữ liệu, bệnh viện, trường học, trạm năng lượng phân tán để tăng khả năng chống chịu khi có sự cố [11][12];

3.3.2. Quy hoạch sử dụng đất: giành quỹ đất nhiều hơn cho năng lượng tái tạo: Quy hoạch diện tích mái nhà, khu đất ven đô cho điện mặt trời; Đất ven biển cho điện gió, đất miền núi cho thủy điện nhỏ (không tràn lan); Tích hợp đất công nghiệp với hạ tầng năng lượng phân tán [5][7]; (v) Quy hoạch đất cho không gian xanh - chống chịu: Tỷ lệ đất dành cho công viên, hồ điều hòa, hành lang thoát nước phải được quy định rõ trong quy hoạch; Ưu tiên đất ven sông, ven biển cho giải pháp sinh thái (rừng ngập mặn, công viên ngập nước) [9][15]; (vi). Dành đất phát triển các trung tâm dữ liệu, trạm IoT, trung tâm điều hành đô thị thông minh. Đảm bảo hạ tầng số gắn liền với hạ tầng vật chất [11][12]; (vii) Đất cho phát triển đa chức năng: Kết hợp đất ở - thương mại - dịch vụ trong cùng khu vực để giảm nhu cầu di chuyển; Tăng hiệu quả sử dụng đất, tạo ra "khu đô thị tích hợp" chức năng [10]. Như vậy, công tác quy hoạch cần tổ chức không gian đô thị theo hướng phân tán - xanh - thông minh, đồng thời quy hoạch sử dụng đất gắn với năng lượng tái tạo, hạ tầng số và chống chịu khí hậu. Đây là nền tảng để đô thị Việt Nam phát triển bền vững thời kỳ mới hay thế hệ mới.

3.4. Các giải pháp chính sách và quản trị

Để đảm bảo tính khả thi trong việc hình thành hệ thống đô thị thế hệ mới tại Việt Nam, cần triển khai đồng bộ các giải pháp chính sách và quản trị.

3.4.1. Hoàn thiện thể chế và chính sách: (i) Đối với khung pháp lý: xây dựng cơ chế mua bán điện trực tiếp, quy định quyền tự chủ năng lượng của cộng đồng và chuẩn hóa tiêu chí kỹ thuật cho micro-grid [5]; (ii) Đầu tư hạ tầng dữ liệu và đô thị thông minh: phát triển trung tâm dữ liệu, hệ thống IoT, nền tảng AI và Big Data để quản lý đô thị theo thời gian thực [11][12]; (iii) Quy

hoạch đô thị đa trung tâm gắn với giao thông công cộng: giảm tải hạ tầng, phân tán dân cư và tăng khả năng chống chịu [10][14]; (iv) Thúc đẩy hợp tác công - tư và thu hút đầu tư quốc tế: xây dựng cơ chế tài chính xanh, ưu đãi thuế cho doanh nghiệp đầu tư năng lượng tái tạo và hạ tầng số [7][9].

3.4.2. Mô hình quản trị đô thị thế hệ mới: Khác với quản trị đô thị truyền thống tập trung, mô hình mới nhấn mạnh tính linh hoạt, liên ngành và tham gia đa bên, nhằm đảm bảo đô thị vừa phát triển bền vững, vừa có khả năng phản ứng nhanh với các cú sốc kinh tế, thiên tai và xã hội [3][4][10]. Đặc trưng chính: (i) Quản trị dữ liệu và thông tin theo thời gian thực: sử dụng IoT, Big Data và AI để thu thập, phân tích và dự báo nhu cầu năng lượng, giao thông, chất lượng không khí và nước [12][14]; (ii) Quản trị linh hoạt và liên ngành: kết nối các cơ quan quản lý đô thị, sở ngành, doanh nghiệp và cộng đồng dân cư; áp dụng cơ chế thử nghiệm chính sách để triển khai thí điểm [10]; (iii) Tham gia đa bên và minh bạch: khuyến khích sự tham gia của tổ chức phi chính phủ, doanh nghiệp tư nhân, viện nghiên cứu và cộng đồng dân cư; nâng cao niềm tin xã hội [9]; (iv) Quản trị dựa trên kết quả và chỉ số đánh giá khả năng chống chịu (Urban Resilience Index-URI), tỷ lệ năng lượng phân tán, mức độ số hóa đô thị, chỉ số chống chịu thiên tai [8][11].

3.4.3. Ứng dụng tại Việt Nam: Hà Nội: xây dựng trung tâm điều phối dữ liệu đô thị, kết nối các điểm năng lượng phân tán (micro-grid) tại các đô thị trực thuộc, phối hợp liên ngành giữa Sở, đặc biệt đối với Sở Xây dựng và Sở Công Thương [5][12]. TP.HCM: Áp dụng hệ thống quản trị dữ liệu giao thông và năng lượng, thí điểm xe điện công cộng và phương tiện kết nối lưới điện (Vehicle-to-Grid -V2G), tăng cường cơ chế tham gia đa bên [14]. Đà Nẵng, Huế, Hải Phòng, Cần Thơ: Sử dụng mô hình quản trị dựa trên kết quả, giám sát hạ tầng sinh thái và logistics, xây dựng cơ chế phản ứng nhanh trước thiên tai và sự cố chuỗi cung ứng [11][15].

3.4.4. Phân cấp quản trị

Cấp Trung ương: xây dựng chính sách và khung pháp lý đô thị thông minh, năng lượng phân tán và chống chịu [7].

Cấp tỉnh (UBND tỉnh/thành phố trực thuộc Trung ương): UBND tỉnh hoạch định chiến lược, quy hoạch, chương trình. Điều phối quy hoạch cấp tỉnh, quy hoạch chung đô thị trực thuộc, đầu tư hạ tầng trọng điểm kết nối đô thị - nông thôn, khu công nghiệp, cảng biển, hạ tầng logistics [10]. Đầu tư hạ tầng chiến lược: trung tâm dữ liệu, micro-grid, hệ thống giao thông điện hóa [11]. Hỗ trợ tài chính và cơ chế ưu đãi: thành lập quỹ phát triển đô thị thông minh, ưu đãi thuế cho dự án năng lượng tái tạo [9].

Cấp xã/phường (UBND xã, phường): Triển khai dự án năng lượng phân tán và micro-grid tại địa phương [5]. Vận hành hệ thống dữ liệu cấp xã, dữ liệu từ Internet vạn vật (IoT), dự báo các nhu cầu điện, giao thông, nước sạch và môi trường [11]. Thực thi chính sách linh hoạt theo tình hình thực tế, thử nghiệm cơ chế mới về quản lý năng lượng và giao thông điện hóa [12]. Thúc đẩy tham gia cộng đồng: khuyến khích hộ gia đình, doanh nghiệp địa phương tham gia quản lý năng lượng, sử dụng xe điện, tiết kiệm năng lượng [9].

UBND cấp tỉnh ban hành cơ chế phối hợp hai chiều đảm bảo thực thi chính sách từ trên xuống, dữ liệu và đề xuất từ dưới lên [8][10].

4. KẾT LUẬN

Mô hình đô thị thế hệ mới không chỉ là hướng đi tất yếu mà còn là cơ hội chiến lược để Việt Nam chuyển đổi các vùng đô thị lớn thành những siêu đô thị thế hệ mới có khả năng cạnh tranh và có hệ sinh thái năng động, bền vững và chống chịu cao. Khi được triển khai đồng bộ với 3 trụ cột chính: năng lượng phân tán, công nghệ số và quản trị linh hoạt, mô hình này sẽ giúp các đô thị trọng điểm như Hà Nội, TP.HCM và các đô thị trực thuộc Trung ương nâng cao khả năng tự chủ, dự báo rủi ro và phản ứng nhanh trước các cú sốc kinh tế, thiên tai và biến đổi khí hậu [5][10][11][12][15]. Đồng thời, việc áp dụng các giải pháp năng lượng tái tạo, giao thông điện hóa và hạ tầng dữ liệu thông minh sẽ góp phần giảm phát thải, tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và nâng cao chất lượng sống cho người dân [11][12][14]. Đô thị thế hệ mới là hướng đi khả quan, tạo ra lợi thế cạnh tranh quốc gia, thu hút đầu tư, thúc đẩy đổi mới sáng tạo và phát triển kinh tế xanh cho Việt Nam [9][10].

Thành công trong triển khai mô hình này tại các đô thị trọng điểm sẽ hình thành một khuôn mẫu học tập và nhân rộng cho các vùng đô thị thuộc tỉnh, góp phần xây dựng Việt Nam trở thành quốc gia tiên phong về phát triển đô thị thông minh, chống chịu và phát triển bền vững trong khu vực và trên trường quốc tế [1][2][3][4]. Do đó, việc định hướng chính sách, hoàn thiện cơ chế pháp lý, đầu tư hạ tầng chiến lược và nâng cao năng lực quản trị đô thị là những bước đi cần thiết, cấp bách và khả thi. Đây cũng là cơ hội để Việt Nam chủ động nắm bắt thách thức và chuyển hóa thành cơ hội phát triển trong bối cảnh toàn cầu đầy biến động [7][8][15].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. UN-Habitat (2016). World Cities Report 2016: Urbanization and Development - Emerging Futures.

2. UN-Habitat (2020). Resilient Cities - The Global Programe.

3. Rockefeller Foundation (2013). 100 Resilient Cities Initiative.

4. Judith Rodin (2014). The Resilience Dividend: Being Strong in a World Where Things Go Wrong. PublicAffairs.

5. International Energy Agency (IEA) (2021). Microgrids for Resilient Communities.

6. World Bank (2018). Vietnam Urbanization Review: Technical Assistance Report.

7. Bộ Xây dựng (2013). Quyết định 2623/QĐ-TTg: Đề án phát triển đô thị Việt Nam ứng phó với biến đổi khí hậu giai đoạn 2013–2020.

8. Bộ Xây dựng - ISET - Quỹ Rockefeller (2016). Bộ chỉ số đô thị chống chịu với biến đổi khí hậu (VN-CRI).

9. Asia Foundation (2017). Urban Climate Resilience in Vietnam: Policy and Practice.

10. OECD (2019). Smart Cities and Inclusive Growth.

11. World Bank (2021). Resilient Urban Infrastructure for Vietnam.

12. McKinsey Global Institute (2018). Smart Cities: Digital Solutions for a More Livable Future.

13. Singapore Urban Redevelopment Authority (URA) (2019). Smart and Resilient City Planning.

14. Shenzhen Municipal Government (2020). Shenzhen Smart City Development Strategy.

15. IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.

Từ phong trào "**bỏ phố về vườn**" tới mô hình "**đô thị nông nghiệp**", tăng cường mạng lưới sinh thái tại Việt Nam

TS.KTS BÙI DUY ĐỨC*

Sự mở rộng nhanh chóng tại các thành phố ở Việt Nam thời gian qua đã làm giảm mạnh diện tích đất nông nghiệp ven đô, gây ra những gián đoạn trong chuỗi cung ứng thực phẩm, trong sự liên tục sinh thái đô thị. Những áp lực này không chỉ gây ảnh hưởng môi trường, chất lượng sống mà còn thúc đẩy sự hình thành các tư tưởng "phản đô thị" - như đã xuất hiện ở các thành phố công nghiệp Mỹ từ thế kỷ 19. Tại đó, các phong trào "trở về nông thôn" thể hiện phản ứng của người dân với các bất cập của quá trình đô thị hóa. Trong các thành phố lớn tại Việt Nam, trào lưu "bỏ phố về vườn" nổi lên từ năm 2018 như một xu hướng "phản đô thị kiểu mới". Chúng tôi muốn thông qua hiện tượng đô thị này, để đề cập tới quan hệ thành phố - nông thôn và vấn đề chất lượng sinh thái. Đặc biệt, trong bối cảnh nhiều đô thị Việt Nam đang mong muốn đạt được tiêu chuẩn "xanh" như một tiêu chí khẳng định chất lượng, liệu nông nghiệp đô thị có thể đóng góp vào hạ tầng sinh thái của những thành phố tương lai không ?

ÁP LỰC LÊN MÔI TRƯỜNG VÀ PHONG TRÀO PHẢN ĐÔ THỊ

Xuất phát điểm ban đầu, phản ứng "chống đô thị" là thái độ nghi ngờ, phủ nhận giá trị của đời sống thành thị, đối lập với lý tưởng nông thôn. Nó đã xuất hiện từ thời Hy Lạp, La Mã cổ đại, mạnh lên trong thời công nghiệp, và tiếp tục tồn tại trong thời hiện đại dưới nhiều hình thức như "ven đô thị hoá - suburbanization", "phân tán dân cư", hay "phê phán siêu đô thị". Tại các thành phố công nghiệp Mỹ, nhiều phong trào phản đô thị trỗi dậy nhằm giúp người dân thoát khỏi những hình ảnh chất lượng sống thấp. Những mô hình đô thị lý tưởng, gần gũi thiên nhiên cũng ra đời từ đó. Jégou Anne - nhà đô thị Pháp, giải thích: "Việc xây dựng các đường cao tốc chính, kết hợp với giấc mơ của người Mỹ về nhà ở có vườn, đã tạo ra một hình thức quy hoạch đô thị mới, được cho là có mối quan hệ chặt chẽ hơn với thiên nhiên". Các yếu tố như công viên, vườn hoa cũng trở nên quan trọng như các tiện nghi đô thị khác. Do đó, việc cân bằng mối quan hệ thành thị - nông thôn là cần thiết cho sự phát triển và kiến tạo ra chất lượng cuộc sống đô thị mới. Tuy nhiên, trong thời đại công nghiệp, xu hướng "phản đô thị" này được phát động trong bối cảnh ô tô thống trị và sự phát triển ồ ạt của cơ sở hạ tầng đường bộ. Chúng được coi là "phương tiện chạy trốn khỏi thành phố". Mặt khác, trên thực tế, sự phát triển của ngành công nghiệp ôtô lại gây ra những hậu quả tiêu cực nhất đối với môi trường.

Ngày nay, "phản đô thị" không chỉ là thái độ của một nhóm cư dân thành thị mà còn là dòng tư tưởng ảnh hưởng đến văn hóa đô thị trên toàn thế giới, và hướng tới sự kết nối đô thị - nông thôn nhiều hơn. Trong các xu hướng "phản đô thị kiểu mới", nông nghiệp đô thị đang đóng góp vào việc mang "thiên nhiên trở lại thành phố" thay vì các giải pháp thoát ly, hạn chế đô thị hoá. Những giải pháp không gian trồng trọt liên kết với cảnh quan đang trở thành yếu tố cần thiết để nâng cao chất lượng cuộc sống tại các đô thị hiện đại. Tại Los Angeles, phong trào "Urban Homesteading" xuất hiện từ đầu thế kỷ 21. Trong đó, các hộ gia đình chủ động tận dụng những không gian nhỏ như sân sau, ban công, mái nhà hoặc lô đất bỏ trống để trồng rau, cây ăn quả, nuôi gia cầm nhỏ. Họ từng bước giảm sự phụ thuộc vào hệ thống tiêu dùng công nghiệp hóa. Ở Việt Nam, phong trào "bỏ phố về vườn" là một hiện tượng đô thị đáng chú ý, mặc dù có nhiều ý kiến khác nhau sau đại dịch Covid-19. Người tham gia phong trào này chủ yếu là người trẻ, giới trung lưu đô thị, có tích lũy, làm việc tự do, kinh doanh nhỏ hoặc làm online. Họ có nhu cầu sống chậm, gần thiên nhiên, nuôi dạy con theo lối sinh thái ở khu vực ven đô, nông thôn, nơi có giá đất rẻ hơn. Phong trào này thường gắn với các hình thức canh tác vĩnh cửu (permaculture) hay nông nghiệp tái tạo để tự chủ thực phẩm một phần và trải nghiệm lối sống khác trong bối

(*) *Cơ quan quy hoạch và phát triển vùng đô thị Toulouse (Pháp)*

cảnh đô thị quá tải và ô nhiễm. Hiện tượng này không phải là chống lại thành phố, mà là phản ứng trước đứt gãy giữa con người - thiên nhiên - thực phẩm trong đô thị hiện đại. Người dân thành thị đang tìm kiếm mô hình sống thay thế cân bằng hơn giữa sinh kế, môi trường và chất lượng sống. Các hiện tượng "bỏ phố về vườn" hay "Urban Homesteading" có thể được xem là những hình thức "phản đô thị mềm".

Trong mạch tư duy về chất lượng đô thị, vấn đề về sự cân bằng đã được nghiên cứu từ "thành phố vườn" của Ebenezer Howard, đây được coi là mô hình gần nhất với thành phố bền vững. Tới nay, lý thuyết này vẫn giữ được giá trị và đóng vai trò quan trọng trong lý luận quy hoạch đô thị. Howard đã ảnh hưởng đến cách chúng ta nhận thức đô thị như một hệ sinh thái phức tạp, một cơ thể sống và yếu tố "thiên nhiên trong thành phố" đã trở thành nguyên tắc quan trọng cho chất lượng của các thành phố bền vững. Cùng nghiên cứu về chủ đề này, Nathalie Blanc cũng nhấn mạnh vị trí của không gian xanh và quy hoạch đô thị xanh trong việc phục hồi thiên nhiên. Thành phố càng xanh và càng có nhiều không gian xanh thì cuộc sống sẽ càng dễ chịu hơn. Vì vậy, trên toàn thế giới, số mét vuông không gian xanh trên mỗi người dân là một chỉ số quan trọng biểu trưng cho chất lượng của các dự án đô thị. Theo hướng này, không gian nông nghiệp đô thị mặc dù là "phi tự nhiên", nhưng có thể đóng góp vào quá trình phủ xanh và tạo ra hình ảnh gần gũi với thiên nhiên.

NÔNG NGHIỆP VÀ QUÁ TRÌNH PHỦ XANH ĐÔ THỊ

Tại nhiều nơi, các khu vườn trong thành phố được coi là thành tố quan trọng của cảnh quan đô thị. Đó là không gian chuyển tiếp, nơi chúng ta tìm thấy mối liên kết với thiên nhiên dưới dạng khoảng xanh giữa phố phường. Từ các vườn cộng đồng, vườn trên ban công, sân thượng, nông nghiệp đô thị đã mang "sắc xanh" trở lại các thành phố bê tông. Với thương hiệu mang tính biểu tượng này, không gian nông nghiệp một mặt được coi là "công cụ dành cho các nhà quy hoạch đô thị", mặt khác là phương tiện để người dân có thể tham gia vào chiến lược phát triển thành phố. Qua một số ví dụ tiêu biểu, chúng tôi muốn làm rõ xu hướng tích hợp không gian nông nghiệp vào kết cấu xanh và các tác động tới môi trường, kinh tế, xã hội của thành phố.

Detroit, Michigan, Mỹ là một "phòng thí nghiệm sống" của đô thị nông nghiệp ở Bắc Mỹ. Đây là ví dụ điển hình của việc đưa canh tác trở lại lõi đô thị hậu công nghiệp. Nơi đây đã từng được biết đến như một trung tâm thế giới về lắp ráp ô tô, sau đó thành phố phải đối mặt với sự suy giảm dân số khi các nhà máy đồng loạt đóng cửa. Từ năm 1950 đến năm 2004, một nửa dân số Detroit đã rời khỏi nơi này. Ban đầu, tại khu vực Lafayette, nông nghiệp đô thị được áp dụng nhằm cung cấp thực phẩm tươi cho cư dân địa phương. "Người dân đã biến khoảng trăm lô đất thành vườn và các "Raised beds" - luống trồng được xây cao trên nền đất đô thị ô nhiễm cũ - tạo không gian xanh công cộng, dọn dẹp và cải tạo đất hoang đô thị. Nhờ lợi thế của mình, các hoạt động nông nghiệp được tích hợp trong quy hoạch phân vùng nhằm mục đích bảo vệ sức khỏe, an toàn cộng đồng. Sau đó, mô hình không gian nông nghiệp này được người dân phát triển trên khắp thành phố. Có ước tính khoảng 1.300 đến 1.400 trang trại và vườn đô thị trong và xung quanh Detroit, trải dài từ các mảnh đất bỏ hoang đến vườn cộng đồng của cư dân địa phương". [theo EMILY BROAD LEIB, 2012] Từ đó, các khu vườn cộng đồng và các chương trình giáo dục nông nghiệp đã được quảng cáo rộng rãi như là giải pháp để hồi sinh Detroit. Đây là một thực nghiệm xã hội - không gian điển hình về cách con người có thể sống khác đi trong bối cảnh khủng hoảng đô thị.

Tại một số thành phố của các quốc gia mới nổi vùng Đông Nam Á, các hoạt động nông nghiệp cũng đang được lồng ghép sâu sắc vào cảnh quan đô thị. Để tăng diện tích cây xanh trong thành phố, Bangkok đang triển khai dự án "15-Minute Garden" - hệ thống các công viên nhỏ phân bố trong các khu dân cư và toà nhà. Dự án giúp cho bất kỳ người dân nào cũng có một mảng xanh cách nhà khoảng 15 phút đi bộ. Mục tiêu là cải thiện kết cấu cảnh quan, giảm hiệu ứng đảo nhiệt, giúp hấp thụ bụi mịn, các khí ô nhiễm, giảm ngập lụt và giữ nước mưa tại địa phương. Hơn 12 triệu cư dân Bangkok được khuyến khích thử nghiệm và làm việc trên các khu vườn đô thị dưới dạng không gian cộng đồng, chiếm 39% bề mặt đô thị. Có thể kể đến những dự án lớn như trang trại đô thị trên mái lớn nhất châu Á - Thammasat Urban Rooftop Farm - với diện tích 22.000 m^2, đây là trang trại trên mái lớn nhất châu Á. Nó có khả năng giữ lại tới 3 triệu gallon nước mưa, giúp giảm ngập lụt đáng kể. Những dự án ở quận Phasi Charoen cũng đã góp phần phục hồi các không gian xanh ven kênh như Kanchanaphisek Park và các "pocket park". Hiện quận này có nhiều "15-minute parks", và dự kiến mở rộng thêm để đảm bảo mỗi khu dân cư có không gian xanh gần gũi. Thành phố đặt mục tiêu tăng không gian xanh lên 10 m^2/người, trong đó nông nghiệp đô thị chiếm tỉ trọng ưu tiên.

Tại Thâm Quyến, nơi nền kinh tế đang phát triển nhanh chóng, họ đã tổ chức "các cộng đồng nông dân nhỏ" theo cấu trúc các ngôi làng có sự đan xen giữa các hoạt động nông nghiệp và đô thị. Việc sản xuất bền vững "nông nghiệp mới", áp dụng hệ thống tự động hóa và AI, được định hình trong chiến lược của thành phố. Đặc biệt, do nhu cầu về cá rất lớn nên hệ thống aquaponics cũng rất phổ biến. Mô hình "cánh đồng nổi" - Floating Fields - một hệ giải pháp nông nghiệp đô thị nổi trên mặt nước. Mô hình này được nghiên cứu, thử nghiệm và thảo luận sôi nổi như giải pháp cho các vấn đề của một đô thị ven biển chịu áp lực ngập lụt, nước biển dâng và thiếu đất. Với công nghệ và năng suất hiện nay, Thâm Quyến đang tìm hiểu xuất khẩu rau "đô thị" sang các nước Nam Á. Đây là thành công quan trọng của mô hình chiến lược này. Ngoài ra, thành phố cũng đi theo xu hướng gắn kết hoạt động nông nghiệp với dịch vụ du lịch, dịch vụ sinh thái. Qua đó, chúng ta thấy một cách nghĩ mới về thành phố không mang tính "phi nông nghiệp" như những định nghĩa truyền thống.

Tại Việt Nam, các thành phố như Đà Lạt, TP.HCM, Hà Nội

đang chứng kiến sự quan tâm ngày càng lớn đến việc tích hợp nông nghiệp đô thị nhằm thúc đẩy phát triển bền vững. Các khu vườn đô thị, công viên nhỏ và thiết kế đô thị có cây xanh đang được sử dụng như giải pháp giảm ô nhiễm, cải thiện vi khí hậu và tăng chất lượng sống cho cư dân. Ở những không gian nhỏ, sự hiện diện của nông nghiệp đã không còn xa lạ. Giải pháp phổ biến nhất là sử dụng các hộp xốp để canh tác trên sân thượng hoặc ở các khu vực công cộng, qua đó đáp ứng nhu cầu rau sạch của các hộ gia đình. Ngoài ra, công việc này còn mang lại màu xanh cho không gian sống của cộng đồng. Tại Việt Nam, ta thấy một tiềm năng lớn cho việc xây dựng mô hình "đô thị nông nghiệp", hướng tới những thành phố bền vững. Trong mô hình này, nông nghiệp không dừng lại ở hoạt động kinh tế, xã hội mà trở nên "đô thị" hơn, "thân thiện" hơn và tham gia trực tiếp vào các mạng không gian xanh trong thành phố.

ĐÔ THỊ NÔNG NGHIỆP VÀ QUY HOẠCH SINH THÁI

Trở lại lĩnh vực quy hoạch đô thị, ở Pháp có một công cụ "khung xanh và xanh lam" (La trame verte et bleue -TVB) là một khái niệm nền tảng được phát triển vào cuối những năm 2000. Nó cho phép chúng ta thiết lập quy hoạch trong không gian các hệ sinh thái trên cạn và dưới nước, như công viên, vườn, không gian công cộng và kết nối những không gian này với nhau. Tại Việt Nam, trong Luật Quy hoạch đô thị 2009, "bộ khung xanh" này được hiểu là cấu trúc cảnh quan cây xanh, mặt nước đô thị, xuất hiện dưới các thuật ngữ như: hệ thống không gian xanh, mặt nước, hành lang bảo vệ sông, suối, đất sinh thái, đất nông nghiệp, hạ tầng kỹ thuật thoát nước - phòng chống ngập. Như vậy, về tư duy, công cụ này đã có nhưng khung pháp lý còn phân mảnh.

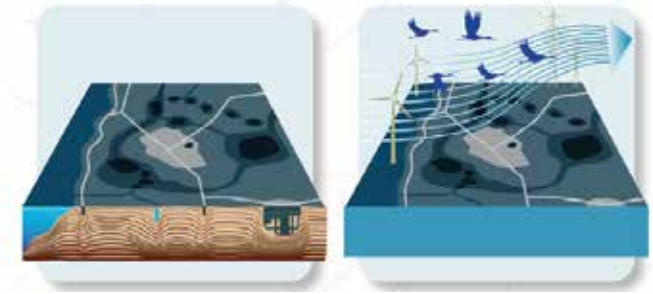
Tại Pháp, "Khung xanh và xanh lam" đã được tích hợp và quy định cụ thể trong Bộ luật Môi trường và Bộ luật Quy hoạch đô thị. Không dừng lại ở đó, các nhà khoa học và chính quyền địa phương đã nêu lên những hạn chế của công cụ này. Họ dẫn chứng việc cách tiếp cận này không xem xét các luồng di chuyển dưới mặt đất hoặc trên không, hay việc xác định các trở ngại đối với sự liên tục sinh thái ở các khung thời gian khác nhau". [theo AUAT, 2024]. Trên thực tế, để tái tạo "thiên nhiên trong thành phố", kết quả không chỉ dừng lại ở việc "phủ xanh" mà quan trọng hơn là đảm bảo chất lượng sinh thái, trong đó biểu hiện quan trọng nhất là sự đa dạng sinh học đô thị. Sự đa dạng này được cấu trúc bởi các cộng đồng thực vật, động vật và con người cũng như tổ chức môi trường sống của chúng trong thành phố. Bộ "Khung xanh và xanh lam" giống như phần nổi của tảng băng, trong khi sự liên tục của hệ sinh thái đô thị diễn ra đồng thời tại nhiều tầng lớp không gian, thời gian khác nhau. Các chuyên gia Pháp đã đề xuất làm phong phú thêm "bộ khung" này thông qua phương pháp tiếp cận đa mạng lưới [theo Sordello, 2017]. Hiện tại, họ đang phát triển "mạng lưới sinh thái" hay "khung cầu vồng" - trame arc-en-ciel - như một công cụ thiết kế mới cho các thành phố của Pháp. Họ gọi công cụ này là "khung cầu vồng" bởi mỗi lớp trong hệ thống này được phát triển thành một "khung" với màu sắc riêng. "Cầu vồng" ở đây không phải là màu sắc hình thức, mà là sự chồng lớp các chức năng sinh thái, cụ thể là:

a) Trong môi trường giao thoa: 1/ Khung màu vàng liên kết với môi trường nông nghiệp. Không chỉ là nơi sản xuất thực phẩm, đây là hành lang di cư cho các loài thụ phấn như ong, bướm và là vùng đệm chống lại sự xâm lấn của đô thị hóa bê tông. 2/ Khung màu ngọc lam quan tâm đến khu vực "đất ngập nước". Trong đô thị, nó đóng vai trò là "vùng lọc" tự nhiên, vừa điều hòa ngập lụt, vừa là môi trường sống cho các loài lưỡng cư. 3/ Khung màu xanh biển tạo điều kiện thuận lợi cho sự di chuyển của động vật biển, bảo vệ các dải rừng ngập mặn và rạn san hô. Đối với các đô thị như TP.HCM hay Hải Phòng, đây là "bức tường xanh" ngăn xâm nhập mặn và triều cường.

1/ Khung màu vàng 2/ Khung màu ngọc 3/ Khung màu xanh biển.

Nguồn: AUAT

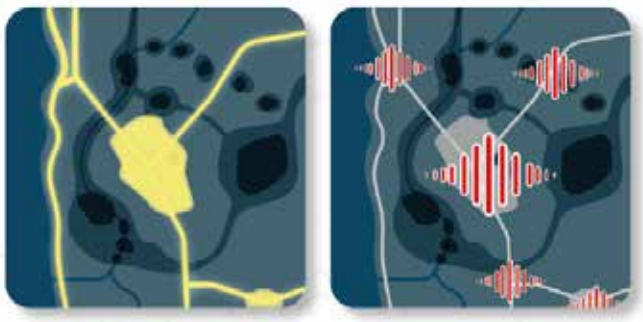
b) Trong các khu vực phi bề mặt: 4/ Khung màu nâu bảo tồn mạng lưới sinh thái chức năng trong lòng đất; liên quan trực tiếp đến rủi ro của đô thị ngầm mà chúng ta đang triển khai tại Hà Nội và TP.HCM. Đất khỏe mạnh chứa mạng lưới vi sinh vật và nấm khổng lồ giúp phân hủy chất thải và lọc nước ngầm. Bảo tồn khung màu nâu là bảo tồn "lá phổi lọc ẩn" của thành phố. 5/ Khung "không trung" thúc đẩy sự di chuyển an toàn của động vật hoang dã trên không, ngăn chặn sự đứt gãy của các đường bay chim di cư. Nó đòi hỏi các quy chuẩn về thiết kế chống va chạm cho chim.



4/ Khung màu nâu 5/ Khung "không trung"

Nguồn: AUAT

c) Mở rộng đến các rào cản về mặt giác quan đối với sự liên tục sinh thái, đây là những khái niệm mới nhất trong tư duy "Quy hoạch có lợi cho sức khỏe": 6/ Khung màu đen tạo thuận lợi cho đời sống về đêm, mạng lưới tối giúp xem xét tốt hơn vòng đời của động thực vật về đêm. 7/ Khung màu trắng cho phép các loài di chuyển với mức độ tiếng ồn có thể chấp nhận được để đảm bảo chu kỳ sinh học của chúng. Đối với con người, đây là những "ốc đảo yên tĩnh" giúp giảm stress đô thị và lo âu.

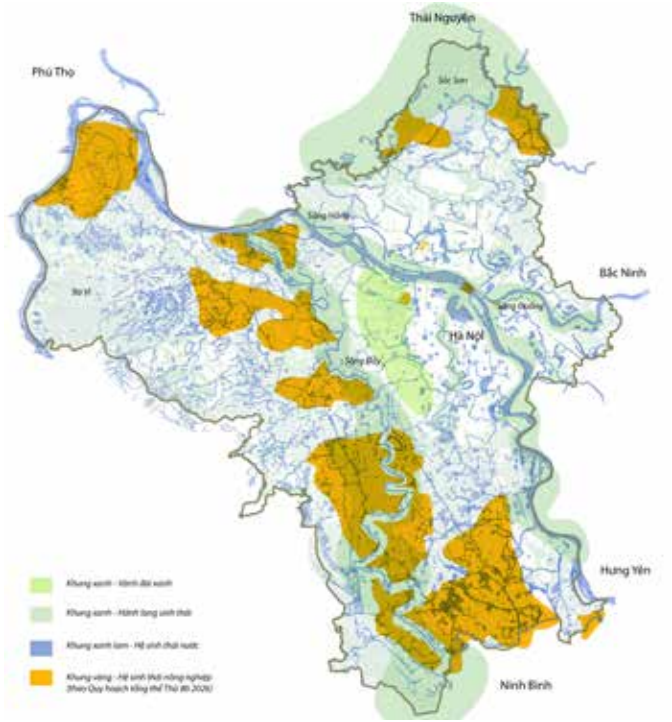


6/ Khung màu đen *7/ Khung màu trắng*

Nguồn: AUAT

Trong phương pháp tiếp cận đa mạng lưới này, nông nghiệp đô thị không chỉ là một thành phần bổ sung, mà là lớp không gian sản xuất - sinh thái - xã hội giúp liên kết và kích hoạt các "khung xanh, xanh lam". Nhờ đó, đô thị được tái cấu trúc như một hệ sinh thái sống, nơi hạ tầng, cảnh quan và sản xuất lương thực cùng tồn tại và hỗ trợ lẫn nhau. Nông nghiệp đô thị không còn chỉ đơn thuần tham gia vào các "mảng xanh", mà còn kiến tạo lớp liên kết giúp các khung khác trong mạng lưới hoạt động hiệu quả và có tính "sống" (productive landscape). Tại khung đất vàng, với các môi trường mở, chủ yếu là đất canh tác, sự tham gia của canh tác vĩnh cửu (permaculture) có lợi cho độ phì nhiêu và đa dạng sinh học của đất. Nó thúc đẩy cơ sở hạ tầng và các hoạt động nông nghiệp sinh thái. Tiếp đến, không gian canh tác xen kẽ, giúp côn trùng thụ phấn, thu hút các loài chim ở khung không trung. Đồng thời, hoạt động này đóng góp vào chu trình nước, hấp thụ và lưu trữ CO_2, hỗ trợ các loài sinh vật đất hoạt động trong khung nâu. Ngoài ra, các hồ điều tiết kết hợp canh tác, đất nông nghiệp thấm nước hay nông nghiệp ngập nước giúp tăng cường hệ sinh thái vùng đệm như khung màu xanh ngọc. Từ đó, các không gian cây xanh, mặt nước không còn là thuần trang trí hay canh tác mà tạo hệ sinh thái sống cho thành phố nông nghiệp. Trong mô hình đô thị này hệ thống không gian nông nghiệp được xem như một lớp trung gian, chồng lên các hành lang sinh thái, thủy hệ và không gian công cộng, tạo thành một "khung cầu vồng" đa chức năng, trong đó sản xuất lương thực, điều tiết nước, cải thiện khí hậu và gắn kết xã hội diễn ra đồng thời trong cùng một cấu trúc không gian.

Liên hệ quy hoạch Việt Nam, bộ công cụ này rất phù hợp với những dự án trọng điểm hiện nay như dự án ven sông Hồng hay vành đai xanh, nơi có tiềm năng và lợi thế đặc biệt để phát triển mô hình đô thị nông nghiệp. Bên cạnh đó, Hà Nội có tổng diện tích tự nhiên 3.36 nghìn km^2, trong đó 197.793 ha là đất nông nghiệp (chiếm khoảng 58,9% diện tích tự nhiên), có thể phát triển mạng lưới môi trường giao thoa ở ngoại thành. Ngoài ra, tại những dự án khu đô thị xanh, đô thị sinh thái cũng có thể áp dụng "khung cầu vồng" và không gian "đô thị nông nghiệp" ở quy mô phù hợp để kiến tạo chất lượng sống cho các cư dân, thông qua lối sống và cách tăng cường sự hiện diện của đa dạng sinh học. Theo nhà cảnh quan nổi tiếng, giáo sư trường Kiến trúc Cảnh quan Quốc gia Versailles, Pháp - Gilles Clément: "Sự đa dạng sinh học đô thị này được coi là sự đảm bảo cho tương lai của nhân loại". Như vậy, qua một



Minh hoạ : Sơ đồ hệ sinh thái nông nghiệp Hà Nội - khung vàng bổ trợ "Khung xanh và xanh lam". Nguồn: Duy Đức, dữ liệu trích Quy hoạch tổng thể Thủ đô 3/2026

quá trình phát triển đột phá, những thành phố của Việt Nam đang vươn mình mạnh mẽ và khẳng định vị thế trong khu vực. Nhưng cùng với đó, hệ sinh thái đô thị của chúng ta cũng chịu những tổn thương lớn. Việc mang thiên nhiên trở về trong môi trường đô thị sẽ không chỉ là một phong trào xã hội hay thương hiệu quảng bá sản phẩm bất động sản, mà hành động đó thể hiện mong muốn cải thiện môi trường và lối sống của thành phố. Bằng liên kết không thể tách rời với các yếu tố đất, nước và đa dạng sinh học đô thị. Các hoạt động nông nghiệp trong thành phố sẽ cho phép người dân được hưởng lợi từ việc tiếp xúc với thiên nhiên, như trong các mô hình "thành phố vườn", "thành phố sinh thái" đã từng hướng tới.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. Anne Jégou (2007) Các nhà địa lý Pháp đối mặt với phát triển bền vững. L'Information géographique, hal-02476154

2. Broad Leib, Emily, (tháng 9 năm 2013) Chính trị là địa phương: Tăng cường khả năng tiếp cận thực phẩm thông qua hành động của chính quyền địa phương. SSRN.2339261

3. DUCHEMIN Eric, WERGMULLER Fabien, LEGAULT Anne-Marie (2010) Nông nghiệp đô thị: một công cụ đa chiều cho phát triển khu dân cư, Vertig0 - tạp chí điện tử về khoa học môi trường, Tập 10

4. Nathalie Blanc, Philippe Clergeau (2010). Lắp đặt mạng lưới xanh trong thành phố? Quan điểm của các nhà nghiên cứu? Urbanisme, 36 halshs-00733306

5. Sordello F. (2017), Khung xanh, xanh lam và tất cả các mạng lưới khác mà chúng ta cũng nên quan tâm, SFE,

6. AUAT, (tháng 6/2024) Bảo tồn đa dạng sinh thái tốt hơn, với khung cầu vồng? Quan sát hợp tác về Môi trường, Cơ quan Phát triển Đô thị và Vùng đô thị Toulouse, Pháp.

Số hóa vật liệu "xanh" hướng tới Net Zero

THS LÊ TÙNG LÂM*

THS TRẦN NGỌC HIẾU**

Trong mô hình cũ, công trình chủ yếu được đánh giá bằng tiến độ, chi phí, quy mô và công năng sử dụng. Nhưng trong kỷ nguyên Net Zero, một công trình còn phải trả lời được những câu hỏi hoàn toàn mới: công trình phát thải bao nhiêu carbon, vật liệu nào gây tác động môi trường lớn nhất, hệ thống vận hành có tiêu thụ năng lượng vượt chuẩn hay không, cấu kiện nào có thể tái sử dụng sau 50 năm, và toàn bộ vòng đời tài sản có được quản lý bằng dữ liệu hay không?...

Trong suốt nhiều thế kỷ, ngành Xây dựng được xem là ngành của bê tông, thép, gạch đá và máy móc. Giá trị của một quốc gia thường được phản ánh qua những cây cầu lớn, những tòa nhà cao tầng, những khu đô thị hiện đại hay tốc độ phát triển hạ tầng. Tuy nhiên, bước sang thế kỷ 21, dưới áp lực của biến đổi khí hậu, khủng hoảng tài nguyên và cam kết Net Zero toàn cầu, ngành Xây dựng đang đứng trước một cuộc chuyển đổi sâu sắc chưa từng có: công trình không còn chỉ là thực thể vật lý, mà đang trở thành một hệ sinh thái dữ liệu sống vận hành xuyên suốt vòng đời. Đây không đơn thuần là sự thay đổi về công nghệ hay phần mềm. Nó là sự thay đổi về cách nhân loại hiểu bản chất của xây dựng. Trong mô hình cũ, công trình chủ yếu được đánh giá bằng tiến độ, chi phí, quy mô và công năng sử dụng. Nhưng trong kỷ nguyên Net Zero, một công trình còn phải trả lời được những câu hỏi hoàn toàn mới: công trình phát thải bao nhiêu carbon, vật liệu nào gây tác động môi trường lớn nhất, hệ thống vận hành có tiêu thụ năng lượng vượt chuẩn hay không, cấu kiện nào có thể tái sử dụng sau 50 năm, và toàn bộ vòng đời tài sản có được quản lý bằng dữ liệu hay không?...

Chính tại đây, khái niệm "vật liệu xanh" bắt đầu thay đổi bản chất. Trong nhiều năm, nhiều sản phẩm được gọi là "xanh" chủ yếu dựa trên quảng bá thương mại hoặc các chỉ số rời rạc. Nhưng trong nền kinh tế carbon thấp tương lai, "xanh" không còn là cảm tính. "Xanh" phải trở thành một thuộc tính dữ liệu có thể đo lường, kiểm chứng, truy xuất và tối ưu hóa liên tục. Một vật liệu muốn được xem là "xanh" sẽ cần có dữ liệu GWP, EPD, đánh giá LCA và khả năng truy xuất vòng đời thông qua BIM và Digital Twin. Điều này phản ánh một thay đổi rất lớn: carbon đang trở thành "ngôn ngữ mới" của ngành Xây dựng. Nếu trong thế kỷ 20, chi phí là biến số trung tâm của mọi quyết định xây dựng, thì trong thế kỷ 21, carbon đang dần trở thành một "đơn vị điều hành" mới. Một phương án thiết kế không chỉ được đánh giá bằng giá thành, mà còn bằng lượng CO_2 phát sinh trong suốt vòng đời công trình. Một loại vật liệu không chỉ được lựa chọn vì độ bền hay tính thẩm mỹ, mà còn vì dấu chân carbon mà nó mang theo.

Điều đáng chú ý là ngành Xây dựng hiện chiếm khoảng 40% tổng lượng phát thải CO_2 toàn cầu. Trong nhiều năm, thế giới tập trung mạnh vào giảm điện năng tiêu thụ trong vận hành công trình, nhưng lại chưa quan tâm đầy đủ tới carbon hàm chứa trong vật liệu - lượng phát thải phát sinh từ khai thác nguyên liệu, sản xuất xi măng, luyện thép, vận chuyển và thi công. Chính phần "carbon vô hình" này đang trở thành trọng tâm mới của cuộc chiến Net Zero. Tuy nhiên, các phương pháp quản lý truyền thống gần như không đủ khả năng giải quyết bài toán này. Quy trình thiết kế dựa trên CAD 2D, bảng tính rời rạc và hồ sơ giấy khiến dữ liệu bị phân mảnh, khó kiểm chứng và gần như không thể truy xuất xuyên suốt vòng đời công trình. Những thay đổi thiết kế thường được xử lý thủ công, gây lãng phí vật liệu và phát sinh chi phí lớn. Trong nhiều trường hợp, công trình chỉ phát hiện vấn đề về năng lượng hoặc phát thải sau khi đã hoàn thành thi công - khi cơ hội tối ưu tốt nhất đã bị bỏ lỡ.

Đó là lý do BIM, LCA, EPD, Digital Twin và AI đang dần hội tụ thành nền tảng cốt lõi của ngành Xây dựng thế hệ mới. Nếu trước đây BIM thường bị hiểu đơn giản là "mô hình 3D", thì hiện nay BIM đang chuyển hóa thành hạ tầng dữ liệu carbon của công trình. Mỗi BIM Object không còn chỉ mang hình học, mà còn mang dữ liệu vật liệu, lượng phát thải, tuổi

(*) Trưởng Ban Đô thị HĐND TP Đà Nẵng
(**) Công ty CP Xây dựng công nghệ BIM4C

thọ vận hành, khả năng tái sử dụng và dấu chân môi trường. Công trình từ đó chuyển hóa thành một "thực thể dữ liệu" có khả năng được đo lường, mô phỏng và tối ưu liên tục. Đây là bước chuyển rất quan trọng của ngành Xây dựng: từ "geometry-centric BIM" sang "data-centric BIM". Trong mô hình mới, giá trị của BIM không còn nằm ở độ đẹp của mô hình hình học, mà nằm ở khả năng phục vụ ra quyết định thông minh. Một mô hình ít polygon nhưng đầy đủ dữ liệu carbon có thể giá trị hơn nhiều so với một mô hình siêu chi tiết nhưng không có khả năng đánh giá môi trường.

Khi BIM kết hợp với EPD và LCA, ngành Xây dựng lần đầu tiên có khả năng tính toán carbon theo từng cấu kiện ngay từ giai đoạn ý tưởng thiết kế. Một dầm thép, một sàn bê tông hay một hệ facade không còn chỉ có khối lượng và kích thước, mà còn có GWP, dữ liệu tái chế, kịch bản cuối vòng đời và khả năng tái sử dụng. Điều này cho phép hình thành Carbon Budget - dự toán carbon song song với dự toán tài chính. Đây là một thay đổi mang tính cách mạng. Trong quá khứ, dự án chỉ quan tâm "công trình tốn bao nhiêu tiền". Nhưng trong tương lai, công trình sẽ phải đồng thời trả lời: "công trình phát thải bao nhiêu carbon". Khi mô hình BIM được kết nối với Autodesk Takeoff, One Click LCA hay EC3, hệ thống có thể tự động bóc tách khối lượng vật liệu và quy đổi thành $kgCO_2e$ theo từng cấu kiện. Khi kiến trúc sư thay đổi vật liệu hoặc phương án thiết kế, lượng carbon toàn công trình có thể thay đổi theo thời gian thực. Điều này tạo ra một bước tiến cực kỳ quan trọng: carbon bắt đầu trở thành dữ liệu động thay vì dữ liệu tĩnh.

Chính tại đây, AI bắt đầu đóng vai trò trung tâm. Một công trình hiện đại có thể chứa hàng triệu BIM Object, hàng nghìn thông số vật liệu, dữ liệu thời tiết, dữ liệu vận hành, dữ liệu năng lượng, dữ liệu logistics và dữ liệu vòng đời môi trường. Không một nhóm chuyên gia nào có thể xử lý toàn bộ lượng dữ liệu đó bằng phương pháp thủ công. Nhưng AI có thể. AI cho phép ngành Xây dựng bước từ "số hóa" sang "tự tối ưu hóa". Các AI Agent chuyên ngành sẽ dần xuất hiện như những "nhân sự số" của doanh nghiệp xây dựng: Carbon Agent, Energy Agent, Material Agent, Compliance Agent hay Facility Agent. Những hệ AI này có thể đọc BIM Object, phân tích EPD, mô phỏng carbon, đánh giá năng lượng và đề xuất phương án tối ưu theo thời gian thực. Điều này sẽ làm thay đổi hoàn toàn cách thiết kế và vận hành công trình. Trong tương lai, kiến trúc sư và kỹ sư sẽ không còn làm việc một mình với mô hình BIM, mà làm việc cùng các hệ trí tuệ số có khả năng thử nghiệm hàng nghìn phương án trong thời gian rất ngắn.

Khi AI kết hợp với Digital Twin, công trình bắt đầu trở thành "thực thể số sống". Khác với BIM truyền thống, Digital Twin không chỉ là mô hình mô tả công trình, mà là bản sao số có khả năng liên tục nhận dữ liệu từ cảm biến, IoT và hệ thống vận hành thực tế. Điều này cho phép công trình theo dõi tiêu thụ năng lượng theo thời gian thực, phát hiện bất thường, dự báo bảo trì và tối ưu carbon liên tục. Một hệ HVAC hoạt động kém hiệu quả, một thiết bị tiêu thụ điện bất thường hay một khu vực có tải nhiệt cao đều có thể được phát hiện sớm để can thiệp kịp thời. Đây là bước chuyển từ "smart building" sang "cognitive building". Từ cấp độ công trình, Digital Twin tiếp tục mở rộng sang cấp độ đô thị. Khi hàng nghìn công trình Digital Twin được kết nối, thành phố bắt đầu hình thành "bản sao số" phản ánh liên tục giao thông, năng lượng, môi trường, phát thải và hành vi đô thị. Đây là nền tảng của đô thị Net Zero tương lai.

Tuy nhiên, toàn bộ hệ sinh thái này chỉ có thể vận hành nếu dữ liệu được chuẩn hóa. Không có tiêu chuẩn, BIM chỉ là các mô hình rời rạc, EPD chỉ là các file PDF riêng lẻ, còn AI sẽ trở thành cỗ máy xử lý dữ liệu hỗn loạn. Đó là lý do các tiêu chuẩn như ISO 19650, ISO 14040/44, ISO 14025, IFC, OmniClass hay UniClass đang trở thành nền móng của ngành Xây dựng thế hệ mới. Trong bối cảnh Việt Nam, nhu cầu xây dựng VNClass, cơ sở dữ liệu EPD quốc gia, thư viện BIM quốc gia, Material Passport, Urban Digital Twin và Regulatory Sandbox AI -BIM-Carbon không còn là nhiệm vụ kỹ thuật riêng lẻ, mà là nền móng của kiến trúc dữ liệu xây dựng quốc gia. Điều này đặc biệt quan trọng khi CBAM và các cơ chế kiểm toán carbon toàn cầu ngày càng siết chặt. Trong tương lai gần, vật liệu xây dựng muốn tham gia chuỗi cung ứng quốc tế sẽ buộc phải có dữ liệu carbon minh bạch.

Đối với Việt Nam, đây vừa là thách thức, vừa là cơ hội lịch sử. Việt Nam vẫn đang trong quá trình đô thị hóa mạnh, nghĩa là phần lớn công trình và hạ tầng tương lai vẫn chưa được xây dựng. Điều đó cho phép chúng ta có khả năng thiết kế hệ dữ liệu đúng ngay từ đầu, chuẩn hóa BIM từ đầu và xây dựng hệ sinh thái Net Zero ngay từ nền móng. Nếu tận dụng tốt cơ hội này, Việt Nam không chỉ giảm phát thải carbon, mà còn có thể hình thành một mô hình phát triển đô thị số và xây dựng xanh mang bản sắc riêng - nơi dữ liệu trở thành tài sản chiến lược, carbon trở thành đơn vị điều hành và AI trở thành năng lực vận hành cốt lõi của toàn ngành.

Cuộc chuyển đổi này chắc chắn sẽ không dễ dàng. Nó đòi hỏi thay đổi tư duy, cải cách thể chế, chuẩn hóa dữ liệu, đầu tư hạ tầng số và đào tạo một thế hệ nhân lực hoàn toàn mới. Nhưng lịch sử cho thấy mọi cuộc cách mạng công nghiệp đều mở ra cơ hội cho những quốc gia biết đi đúng hướng ở thời điểm chuyển giao. Net Zero chính là một thời điểm như vậy. Trong thời đại mới, lợi thế cạnh tranh của ngành Xây dựng sẽ không còn nằm chủ yếu ở tài nguyên, lao động giá rẻ hay quy mô thi công. Nó sẽ nằm ở khả năng tổ chức dữ liệu, năng lực quản trị carbon, tốc độ tối ưu bằng AI và khả năng vận hành hệ sinh thái số quy mô lớn.

Cuối cùng, điều quan trọng nhất mà kỷ nguyên Net Zero mang lại có lẽ không chỉ là công nghệ mới, mà là một cách nhìn mới về mối quan hệ giữa con người, đô thị và hành tinh. Công trình sẽ không còn chỉ là nơi trú ngụ hay sản xuất. Đô thị sẽ không còn chỉ là tập hợp của hạ tầng và bất động sản. Ngành Xây dựng sẽ không còn chỉ là ngành tiêu thụ tài nguyên khổng lồ. Tất cả sẽ trở thành một hệ sinh thái dữ liệu sống, nơi vật liệu, năng lượng, carbon và trí tuệ nhân tạo được kết nối trong một vòng tuần hoàn liên tục nhằm hướng tới phát triển bền vững lâu dài. Và trong hệ sinh thái đó, "xanh" sẽ không thể tồn tại nếu thiếu "số". Bởi trong kỷ nguyên mới, chỉ những gì được đo lường bằng dữ liệu, được vận hành bằng trí tuệ và được tối ưu liên tục mới có khả năng thực sự bền vững.❖

THIẾT KẾ THÀNH PHẦN BÊ TÔNG CHO ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO:

Cần tiếp cận theo tuổi thọ công trình

PGS.TS NGUYỄN THANH SANG*

Thiết kế bê tông cho đường sắt tốc độ cao cần vượt ra khỏi cách tiếp cận truyền thống dựa chủ yếu vào cường độ nén, chuyển sang kiểm soát đồng thời độ bền lâu, khả năng chống xâm thực và tuổi thọ khai thác của kết cấu.

Đường sắt tốc độ cao đặt ra yêu cầu rất cao đối với kết cấu bê tông cốt thép, không chỉ về cường độ chịu lực mà còn về độ bền lâu, khả năng chống xâm thực, hạn chế nứt và duy trì ổn định trong suốt vòng đời khai thác. Vì vậy, thiết kế thành phần bê tông cần được tiếp cận theo tuổi thọ công trình, gắn với điều kiện vật liệu, môi trường và yêu cầu khai thác thực tế của Việt Nam.

YÊU CẦU ĐẶC BIỆT ĐỐI VỚI BÊ TÔNG TRONG ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO

Những sự cố hạ tầng gần đây trên thế giới, trong đó có vụ sập một phần cầu Carola bắc qua sông Elbe tại thành phố Dresden, Đức vào sáng 11/9/2024, cho thấy vấn đề suy giảm chất lượng, tuổi thọ và bảo trì kết cấu bê tông cốt thép đang trở thành thách thức lớn trong quản lý tài sản hạ tầng hiện đại. Đối với đường sắt tốc độ cao, yêu cầu này càng nghiêm ngặt hơn do công trình phải chịu tải trọng động lớn, rung động lặp lại, biến đổi nhiệt độ, môi trường xâm thực và yêu cầu duy trì hình học tuyến trong thời gian dài.

Khi vận tốc đoàn tàu đạt từ 250 - 350 km/h, các kết cấu bê tông cốt thép như cầu cạn, bản mặt cầu, dầm hộp, móng trụ, hầm, kết cấu slab track và các cấu kiện đúc sẵn phải làm việc trong điều kiện khắt khe hơn nhiều so với các công trình giao thông thông thường. Các kết cấu này không chỉ chịu tải trọng lặp chu kỳ lớn và rung động liên tục, mà còn chịu tác động đồng thời của biến đổi nhiệt độ, độ ẩm, môi trường xâm thực và yêu cầu duy trì độ ổn định hình học tuyến trong suốt quá trình khai thác.

Trong điều kiện đó, thiết kế thành phần bê tông không thể chỉ dựa trên chỉ tiêu cường độ nén theo cách tiếp cận truyền thống. Cường độ là yêu cầu cần thiết, nhưng chưa đủ để bảo đảm tuổi thọ công trình. Đối với đường sắt tốc độ cao, bê tông cần được thiết kế theo hướng "thiết kế theo tuổi thọ công trình" (service life design), trong đó các chỉ tiêu về độ bền lâu, khả năng chống xâm thực và khả năng duy trì tính năng cơ học dài hạn phải được xem xét ngay từ giai đoạn thiết kế cấp phối.

Đối với các công trình đường sắt tốc độ cao trên thế giới, tuổi thọ thiết kế thường được yêu cầu từ 100 - 120 năm. Điều này đòi hỏi bê tông không chỉ đạt cường độ cao mà còn phải có độ đặc chắc lớn, khả năng chống thấm tốt, hạn chế nứt, chống xâm nhập ion chloride, chống cacbonat hóa, chống ăn mòn cốt thép và duy trì tính năng cơ học ổn định trong thời gian dài. Với điều kiện khí hậu nhiệt đới nóng ẩm của Việt Nam, lượng mưa lớn, nhiều khu vực ven biển có môi trường chứa ion chloride và sự chênh lệch nhiệt độ theo mùa, yêu cầu về độ bền lâu của bê tông càng cần được đặt ra một cách nghiêm túc hơn đối với hệ thống đường sắt tốc độ cao trong tương lai.

Thực tế cho thấy, tình trạng ăn mòn và hư hỏng kết cấu bê tông cốt thép trong nhiều công trình hạ tầng hiện nay đã và đang đặt ra yêu cầu cấp thiết về kiểm soát chất lượng vật liệu và tuổi thọ công trình. Bên cạnh một số công trình có tuổi thọ trên 30 - 40 năm, vẫn có nhiều công trình bị ăn mòn,

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

Hiện trường một phần cầu Carola bắc qua sông Elbe tại Dresden, Đức bị sập. Ảnh: Tagesspiegel.

hư hỏng nặng sau 20 - 25 năm sử dụng, thậm chí có kết cấu bị phá hủy nghiêm trọng chỉ sau 10 - 15 năm. Nguyên nhân có thể đến từ nhiều yếu tố như chất lượng lớp bê tông bảo vệ, chiều dày lớp bảo vệ, vết nứt trong bê tông, điện trở suất của bê tông, công tác bảo dưỡng, tay nghề thi công, bố trí cốt thép, ván khuôn, thiết kế kết cấu, bố trí thoát nước và điều kiện phơi nhiễm của từng hạng mục.

Vì vậy, cải thiện chất lượng bê tông bảo vệ cốt thép ngay từ khâu thiết kế thành phần bê tông là yêu cầu có ý nghĩa chiến lược. Đối với đường sắt tốc độ cao, yêu cầu này không chỉ nhằm bảo đảm khả năng chịu lực ban đầu, mà còn nhằm giảm thiểu ăn mòn, hạn chế chi phí bảo trì, kéo dài tuổi thọ công trình và nâng cao hiệu quả đầu tư trong suốt vòng đời khai thác.

KHÔNG THỂ CHỈ DỰA VÀO CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN 28 NGÀY

Trong thiết kế bê tông truyền thống, cường độ nén ở tuổi 28 ngày thường được xem là chỉ tiêu trung tâm để đánh giá chất lượng bê tông. Cách tiếp cận này có ý nghĩa nhất định đối với yêu cầu chịu lực, nhưng chưa phản ánh đầy đủ khả năng làm việc dài hạn của bê tông trong môi trường khai thác thực tế. Đối với các công trình đường sắt tốc độ cao, nơi kết cấu phải chịu tải trọng động, rung động, tác động môi trường và yêu cầu duy trì ổn định hình học trong thời gian rất dài, việc chỉ kiểm soát cường độ nén là chưa đủ.

Yêu cầu kỹ thuật đối với bê tông trong công trình đường sắt tốc độ cao có thể được xem xét theo hai nhóm chính: bê tông đổ tại chỗ và bê tông dùng cho cấu kiện đúc sẵn, lắp ghép. Mỗi nhóm có đặc điểm thi công, điều kiện bảo dưỡng, yêu cầu kiểm soát chất lượng và mức độ phơi nhiễm môi trường khác nhau. Do đó, thiết kế thành phần bê tông cần tính đến điều kiện làm việc cụ thể của từng loại cấu kiện, thay vì áp dụng một cách đồng nhất theo cấp cường độ.

Hiện nay, một số tiêu chuẩn kỹ thuật trong lĩnh vực đường sắt có tham chiếu hoặc tiếp cận hệ thống tiêu chuẩn châu Âu. Vì vậy, khi áp dụng tại Việt Nam, cần rà soát sự tương thích giữa các cấp cường độ, yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông và các chỉ tiêu độ bền lâu theo hệ thống tiêu chuẩn trong nước. Theo hướng tiếp cận này, cần xem xét sự tương đồng giữa yêu cầu đối với hỗn hợp bê tông xi măng theo TCVN 14586:2025 với hệ thống tiêu chuẩn châu Âu có liên quan; đồng thời làm rõ cách quy đổi cấp bê tông theo TCVN 14585:2025 với các cấp cường độ tương ứng.

Về cấp bê tông, có thể xem xét quy đổi tương đương như sau: B25 tương ứng C20/25; B30 tương ứng C25/30; B35 tương ứng C30/37; B45 tương ứng C35/45; B50 tương ứng C40/50; B55 tương ứng C45/55; B60 tương ứng C50/60. Riêng các cấp B40 và B70 cần được tiếp tục rà soát do không có tương đương trực tiếp trong hệ thống cấp cường độ châu Âu được nêu trong bài. Việc quy đổi này không chỉ có ý nghĩa về mặt ký hiệu kỹ thuật, mà còn là cơ sở để thống nhất yêu cầu thiết kế, thí nghiệm, nghiệm thu và kiểm soát chất lượng bê tông trong điều kiện Việt Nam.

Tuy nhiên, yêu cầu về cường độ mới chỉ là một phần

của bài toán. Về phương diện độ bền lâu, bê tông dùng cho đường sắt tốc độ cao cần đáp ứng đồng thời nhiều chỉ tiêu như khả năng chống xâm nhập ion chloride, khả năng chống cacbonat hóa, khả năng chống xâm thực sulfate, khả năng chống mài mòn cơ học và khả năng chịu mỏi. Bên cạnh đó, thiết kế thành phần bê tông còn phải kiểm soát nguy cơ nứt sớm do nhiệt thủy hóa, co ngót và chênh lệch nhiệt độ. Đây là các yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến độ đặc chắc, khả năng bảo vệ cốt thép và tuổi thọ thực tế của kết cấu.

THIẾT KẾ THEO TUỔI THỌ CÔNG TRÌNH

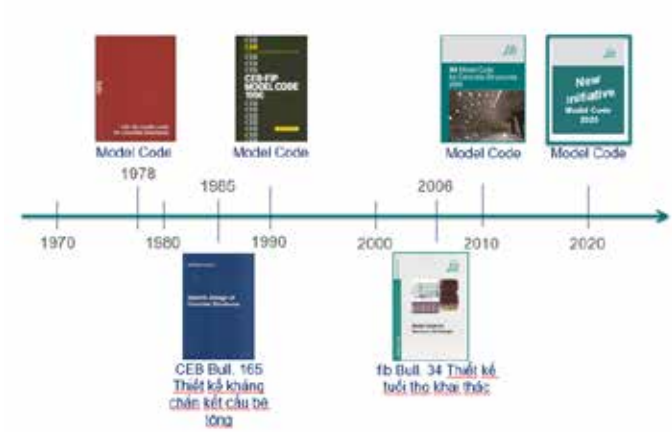
Thiết kế bê tông theo tuổi thọ là phương pháp xác định thành phần vật liệu nhằm bảo đảm kết cấu đạt được thời gian sử dụng yêu cầu trước khi xuất hiện trạng thái giới hạn về độ bền lâu. Khác với thiết kế truyền thống chủ yếu kiểm tra cường độ ở tuổi 28 ngày, phương pháp này xem xét toàn bộ quá trình suy giảm của bê tông trong môi trường khai thác thực tế.

Tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép thường được chia thành hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất là giai đoạn khởi đầu ăn mòn, tức là khoảng thời gian để các tác nhân xâm thực như ion chloride hoặc CO_2 xâm nhập qua lớp bê tông bảo vệ và đạt đến bề mặt cốt thép. Giai đoạn thứ hai là giai đoạn phát triển ăn mòn, bắt đầu từ khi cốt thép bị ăn mòn đến khi kết cấu suy giảm khả năng sử dụng hoặc không còn đáp ứng yêu cầu khai thác.

Các thiết kế hiện đại thường hướng tới mục tiêu kéo dài giai đoạn khởi đầu ăn mòn. Nói cách khác, cần tạo ra lớp bê tông bảo vệ có chất lượng cao, độ đặc chắc lớn, khả năng chống thấm tốt và hạn chế sự xâm nhập của các tác nhân gây ăn mòn. Để thực hiện mục tiêu này, các mô hình tính toán thường dựa trên định luật khuếch tán Fick, hệ số khuếch tán ion chloride, mô hình cacbonat hóa, cấu trúc lỗ mao quản, hệ số thấm nước và chỉ số điện trở suất của bê tông.

Thiết kế thành phần bê tông cho kết cấu đường sắt tốc độ cao cần bảo đảm đồng thời nhiều yêu cầu: khả năng chịu lực, khả năng khai thác sử dụng, độ bền lâu, an toàn và tính kinh tế. Trong thực tế, kết cấu bê tông cốt thép thường chịu tác động của nhiều cơ chế suy giảm như cacbonat hóa bê tông, xâm nhập ion chloride, ăn mòn cốt thép, tấn công sulfate, phản ứng kiềm - cốt liệu, chu kỳ đóng băng - tan băng, nứt do co ngót và tải trọng lặp. Do đó, việc dự báo tuổi thọ công trình không thể chỉ dựa vào một chỉ tiêu đơn lẻ, mà cần được tiếp cận bằng các mô hình tính toán phù hợp với điều kiện vật liệu và môi trường khai thác.

Hiện nay, nhiều mô hình tính toán tuổi thọ đã được phát triển, bao gồm mô hình kinh nghiệm, mô hình cơ học - vật lý, mô hình xác suất, mô hình độ tin cậy, mô hình đa cơ chế và các mô hình ứng dụng trí tuệ nhân tạo, học máy. Trong số đó, mô hình tính toán tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép theo cơ chế xâm nhập ion chloride được sử dụng phổ biến đối với các công trình giao thông, trong đó có đường sắt tốc độ cao. Mô hình này được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống tiêu chuẩn và hướng dẫn như ISO 16204, fib



Quá trình phát triển các bộ Model Code của fib về kết cấu bê tông, trong đó có tiếp cận thiết kế theo tuổi thọ khai thác. Nguồn: ACF-2016-VN.

Model Code, DuraCrete, Life-365, JSCE, ASTM và tiêu chuẩn của Trung Quốc. Tuy nhiên, các mô hình hiện nay vẫn còn một số hạn chế, nhất là việc chưa xét đầy đủ ảnh hưởng của nứt, cũng như mối liên kết với ion chloride khi sử dụng các chất kết dính phụ thêm.

HỆ SỐ KHUẾCH TÁN ION CHLORIDE VÀ NHỮNG YÊU CẦU THIẾT KẾ ĐA CHỈ TIÊU

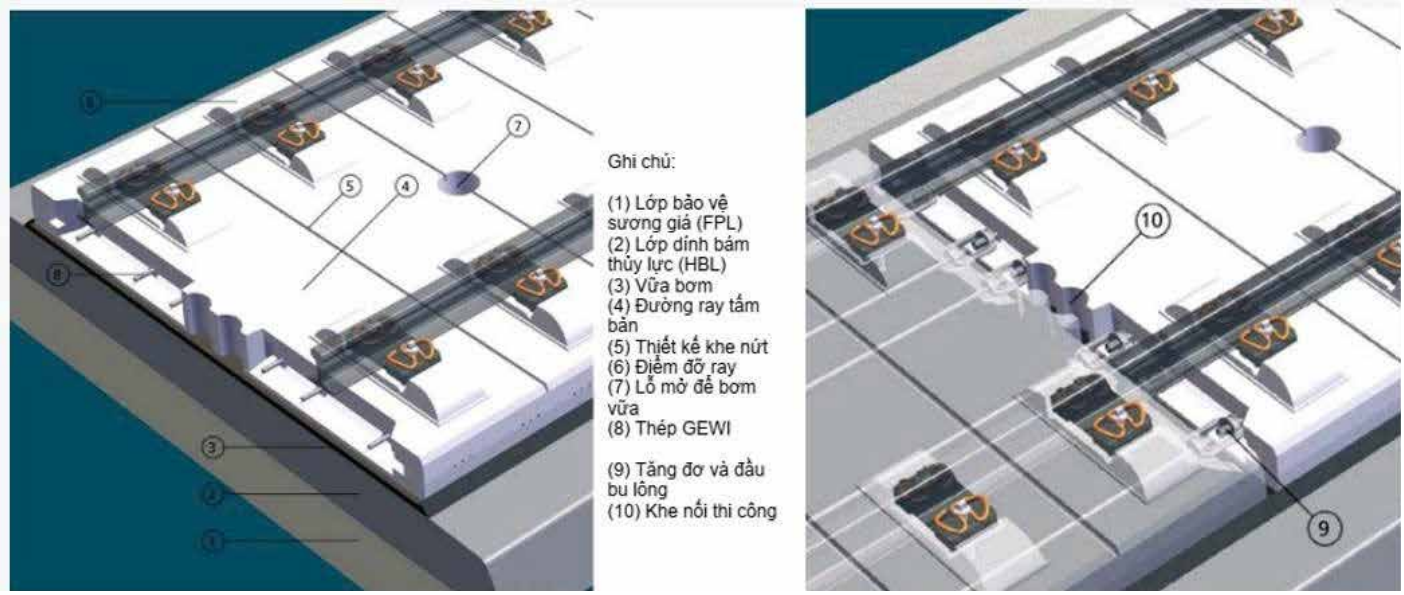
Trong thiết kế thành phần bê tông theo phương pháp truyền thống, cường độ mục tiêu thường được xác định theo công thức: $Rmt = R_B + 1,64s$

Trong đó, RB là cường độ đặc trưng theo TCVN, còn s là độ lệch chuẩn thực nghiệm. Cường độ mục tiêu là cơ sở để lựa chọn tỷ lệ nước/chất kết dính nhằm đạt yêu cầu cường độ thiết kế. Tuy nhiên, tỷ lệ nước/chất kết dính không phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của các chất kết dính phụ thêm đến độ bền lâu của bê tông, đặc biệt là khả năng chống xâm nhập ion chloride.

Với phương pháp thiết kế theo tuổi thọ, nhất là khi sử dụng mô hình dựa trên hệ số khuếch tán ion chloride, cần bổ sung các chỉ tiêu độ bền lâu vào quá trình thiết kế thành phần bê tông. Theo cách tiếp cận trong tiêu chuẩn của Trung Quốc, hệ số khuếch tán ion chloride dùng cho thiết kế, ký hiệu là DRCM.p, được tính toán tương tự như cách xác định cường độ mục tiêu. Công thức được nêu như sau: $DRCM.p = DRCM.28 - 1,64\sigma D$.

Trong đó, DRCM.28 là hệ số khuếch tán ion chloride của bê tông ở tuổi 28 ngày, được xác định bằng phương pháp di chuyển điện nhanh RCM; σD là độ lệch chuẩn của hệ số khuếch tán ion chloride. Khi không xác định được hệ số biến động của hệ số khuếch tán ion chloride, có thể lấy: $DRCM.p = 0,802\ DRCM.28$, với $\delta = 0,15$.

Điểm đáng chú ý là hệ số khuếch tán ion chloride có ý nghĩa ngược với cường độ. Đối với cường độ, giá trị càng lớn càng có lợi; trong khi đó, đối với hệ số khuếch tán ion chloride, giá trị càng nhỏ thì khả năng chống xâm nhập chloride càng tốt. Vì vậy, khi xác định DRCM.p, cần trừ đi



Cấu tạo tấm bản bê tông dùng trong kết cấu đường ray không đá ba lát. Nguồn: Bài giảng Trường ĐH Giao thông vận tải.

khoảng độ lệch ở mức tương ứng 5%.

Theo cách tiếp cận này, hệ số khuếch tán ion chloride được xem như một chỉ tiêu thiết kế quan trọng, có vai trò tương tự như cường độ mục tiêu trong thiết kế cấp phối truyền thống. Từ giá trị DRCM.p, có thể xác định tỷ lệ nước/chất kết dính trong mối quan hệ có xét đến ảnh hưởng của các chất kết dính phụ thêm như tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao nghiền mịn. Đây là cơ sở quan trọng để thiết kế thành phần bê tông đạt đồng thời nhiều chỉ tiêu: cường độ chịu nén, khả năng chống xâm nhập ion chloride và độ bền lâu trong môi trường khai thác thực tế.

Về cơ bản, phương pháp tính toán thành phần bê tông theo tiêu chuẩn Trung Quốc GB/T 51464-2024 cho thấy một hướng tiếp cận đáng tham khảo: thiết kế bê tông không chỉ nhằm đạt cường độ chịu nén, mà còn phải đạt yêu cầu về hệ số khuếch tán ion chloride. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng phương pháp thiết kế thành phần bê tông theo hướng đa chỉ tiêu, phù hợp với yêu cầu của các công trình hạ tầng có tuổi thọ dài như đường sắt tốc độ cao.

VỚI THỰC TRẠNG Ở VIỆT NAM

Đối với Việt Nam, yêu cầu đặt ra không chỉ là lựa chọn cấp bê tông có cường độ cao, mà là xây dựng được hệ tiêu chí thiết kế và kiểm soát chất lượng theo độ bền lâu. Trong đó, các chỉ tiêu như hệ số khuếch tán ion chloride, khả năng chống thấm, điện trở suất, mức độ cacbonat hóa, khả năng chống xâm thực sulfate, co ngót, nhiệt thủy hóa, mài mòn và khả năng chịu mỏi cần được xem xét như những thông số thiết kế quan trọng đối với bê tông dùng trong đường sắt tốc độ cao.

Bên cạnh đó, cần hình thành cơ sở dữ liệu vật liệu trong nước, bao gồm xi măng, phụ gia khoáng, tro bay nhiệt điện, xỉ lò cao nghiền mịn, cốt liệu và phụ gia hóa học. Các dữ liệu này cần được gắn với điều kiện khí hậu, môi trường, vùng miền và yêu cầu khai thác cụ thể của từng loại công trình. Đây là tiền đề để xây dựng các mô hình dự báo tuổi thọ phù hợp với điều kiện Việt Nam, thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào dữ liệu và mô hình từ nước ngoài.

Với sự hỗ trợ của trí tuệ nhân tạo và học máy, việc thiết kế thành phần bê tông xi măng theo hướng đạt đồng thời nhiều chỉ tiêu kỹ thuật là khả thi. Các mô hình dữ liệu có thể hỗ trợ dự báo quan hệ giữa thành phần vật liệu, cường độ, độ thấm, hệ số khuếch tán ion chloride, co ngót, nhiệt thủy hóa và tuổi thọ kết cấu. Tuy nhiên, để ứng dụng trong thiết kế thực tế, các mô hình này cần được kiểm chứng bằng dữ liệu thí nghiệm trong nước, điều kiện vật liệu địa phương và môi trường khai thác cụ thể của Việt Nam.

Từ góc độ tiêu chuẩn và quản lý chất lượng, cần sớm nghiên cứu, hoàn thiện hành lang kỹ thuật cho thiết kế bê tông theo độ bền lâu đối với các kết cấu bê tông cốt thép nói chung và kết cấu bê tông cốt thép trong đường sắt tốc độ cao nói riêng. Hệ thống tiêu chuẩn cần hướng tới việc kiểm soát đồng thời cường độ, độ bền lâu, khả 1năng chống xâm thực và tuổi thọ khai thác. Đồng thời, quy trình kiểm soát chất lượng cần được thực hiện xuyên suốt từ thiết kế cấp phối, thí nghiệm vật liệu, sản xuất bê tông, vận chuyển, thi công, bảo dưỡng đến quan trắc trong giai đoạn khai thác.

Đường sắt tốc độ cao là loại hình hạ tầng có yêu cầu kỹ thuật đặc biệt nghiêm ngặt, vốn đầu tư lớn và thời gian khai thác dài. Vì vậy, thiết kế thành phần bê tông cho loại hình công trình này cần được tiếp cận theo tư duy vòng đời, trong đó tuổi thọ, độ bền lâu và chi phí bảo trì phải được xem là các yếu tố thiết kế ngay từ đầu. Chỉ khi đó, bê tông mới thực sự đáp ứng được yêu cầu của một hệ thống hạ tầng hiện đại, an toàn, bền vững và hiệu quả trong điều kiện Việt Nam.❖

CÔNG NGHỆ SẢN XUẤT VÀ THI CÔNG CẤU KIỆN BÊ TÔNG ĐÚC SẴN CHO ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO TRUNG QUỐC:

Tăng tốc xây dựng nhưng phải kiểm soát chặt chẽ vật liệu, nhiệt độ và quy trình

> GS QIANG YUAN*

Bê tông lắp ghép giúp tăng tốc xây dựng đường sắt tốc độ cao và nâng cao khả năng kiểm soát chất lượng, nhưng đồng thời làm thay đổi vật liệu và kết cấu, đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ vật liệu, nhiệt độ và quy trình.

Trong xây dựng đường sắt tốc độ cao, yêu cầu tiến độ thi công và sản xuất hàng loạt đòi hỏi áp dụng công nghệ cấu kiện bê tông đúc sẵn kết hợp với dưỡng hộ hơi nước nhằm rút ngắn thời gian sản xuất cấu kiện. Tuy nhiên, khi nhiệt độ dưỡng hộ tăng, quá trình hình thành vi cấu trúc bê tông có thể bị thay đổi, kéo theo sự biến đổi về tính chất cơ học và độ bền lâu. Đối với các cấu kiện có kích thước lớn, sự phân bố nhiệt độ không đều trong tiết diện có thể gây biến dạng không đều và phát sinh nội ứng suất trong cấu kiện. Việc sản xuất trong nhà máy không loại bỏ các ảnh hưởng này, mà chỉ cho phép kiểm soát chúng trong giới hạn kỹ thuật. Vì vậy, bên cạnh lợi ích về tăng tốc thi công và công nghiệp hóa sản xuất, công nghệ cấu kiện bê tông đúc sẵn cho đường sắt tốc độ cao đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ về vật liệu, nhiệt độ và quy trình. Nội dung dưới đây làm rõ các ảnh hưởng của chế độ dưỡng hộ đến vật liệu, kết cấu và yêu cầu kiểm soát trong quá trình sản xuất cấu kiện.

NỀN TẢNG CÔNG NGHỆ TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO

Trong xây dựng đường sắt tốc độ cao tại Trung Quốc, bê tông đúc sẵn được sử dụng như một phương thức thi công chính, thay cho thi công tại chỗ truyền thống. Đến cuối năm 2025, tổng chiều dài đường sắt tốc độ cao vượt 50.000 km, với tốc độ khai thác lên tới 350 km/h. Dự kiến đến năm 2030, tổng chiều dài đường sắt vượt 180.000 km, trong đó đường sắt tốc độ cao vượt 60.000 km. Quy mô này tạo ra áp lực trực tiếp về tiến độ thi công và khả năng kiểm soát chất lượng trên diện rộng.

Trong điều kiện đó, việc phụ thuộc nhiều vào thi công bê tông tại chỗ có thể làm tăng khó khăn trong việc bảo đảm đồng thời tiến độ, độ đồng đều và khả năng kiểm soát chất lượng trên diện rộng. Sai lệch giữa các cấu kiện dễ xảy ra khi phụ thuộc vào điều kiện hiện trường. Vì vậy, phương thức được lựa chọn là chuyển sang thi công theo hướng công nghiệp hóa, trong đó cấu kiện được sản xuất trong nhà máy, sau đó vận chuyển ra công trường để lắp dựng. Cách làm này giúp kiểm soát vật liệu, quy trình và chất lượng ngay từ đầu, đồng thời giảm phụ thuộc vào điều kiện thi công tại chỗ.

Các cấu kiện bê tông đúc sẵn được sử dụng rộng rãi trong hệ thống đường sắt tốc độ cao, bao gồm tấm bản đường không đá ba lát, dầm hộp và tà vẹt bê tông. Các dạng kết cấu cụ thể gồm tấm bản đường không đá ba lát CRTS I, CRTS II, CRTS III; dầm hộp đúc sẵn dài 32 m; dầm hộp phân đoạn; và tà vẹt bê tông hai khối. Việc sử dụng các cấu kiện này cho phép chuyển phần lớn khối lượng thi

(*) *Khoa Công trình dân dụng, Đại học Trung Nam; Trung tâm Nghiên cứu kỹ thuật quốc gia về xây dựng đường sắt tốc độ cao (Trung Quốc)*

công sang sản xuất công nghiệp, từ đó rút ngắn thời gian thi công tại hiện trường.

Để phù hợp với mô hình sản xuất hàng loạt, yêu cầu đặt ra là phải rút ngắn thời gian chế tạo cấu kiện. Vì vậy, các phương pháp dưỡng hộ được áp dụng, bao gồm gia nhiệt khô, dưỡng hộ hơi nước, gia nhiệt điện cao tần, gia nhiệt bằng vi sóng, gia nhiệt bằng dòng điện và gia nhiệt hồng ngoại. Trong số này, dưỡng hộ hơi nước được sử dụng phổ biến do quy trình đơn giản và duy trì được môi trường ẩm trong quá trình dưỡng hộ.

Tăng nhiệt độ dưỡng hộ làm bê tông phát triển cường độ nhanh hơn ở giai đoạn đầu. Cường độ nén ở tuổi 1 ngày tăng từ 32 MPa tại 20°C lên 45 MPa tại 80°C. Tuy nhiên, ở tuổi 90 ngày, cường độ lại giảm từ 66 MPa xuống 56 MPa. Điều này cho thấy việc tăng tốc độ phát triển cường độ không diễn ra đồng đều theo thời gian, mà có sự khác biệt giữa giai đoạn sớm và giai đoạn dài hạn.

Như vậy, bê tông đúc sẵn kết hợp với dưỡng hộ hơi nước cho phép tổ chức thi công theo hướng công nghiệp hóa và đáp ứng yêu cầu tiến độ. Đồng thời, việc tăng nhiệt độ dưỡng hộ cũng làm thay đổi quá trình phát triển cường độ của bê tông, đặt ra yêu cầu phải xem xét các ảnh hưởng tiếp theo đối với vật liệu và kết cấu.

ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ DƯỠNG HỘ ĐẾN VI CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT VẬT LIỆU

Dưỡng hộ hơi nước không chỉ làm bê tông đạt cường độ sớm nhanh hơn, mà đồng thời làm thay đổi cấu trúc bên trong của vật liệu. Thay đổi này xuất hiện trước hết ở vùng tiếp giáp/chuyển tiếp giữa các pha, là nơi truyền lực trong bê tông.

Đối với vùng tiếp giáp giữa cốt liệu và đá xi măng, chiều dày vùng này tăng theo nhiệt độ dưỡng hộ. Ở 20°C, độ dày khoảng 30 µm. Khi tăng lên 60°C, độ dày đạt khoảng 50 µm. Ở 80°C, giá trị này đạt khoảng 70 µm. Như vậy, khi nhiệt độ dưỡng hộ tăng, chiều dày vùng tiếp giáp tăng lên. Điều này cho thấy cấu trúc hình thành của đá xi măng thay đổi dưới tác động của nhiệt độ.

Đối với vùng tiếp giáp giữa cốt thép và bê tông, thay đổi thể hiện rõ qua cấu trúc lỗ rỗng. Độ rỗng tăng từ 5,73% tại 20°C lên 10,42% tại 60°C. Đồng thời, tỷ lệ lỗ rỗng nhỏ hơn 40 µm giảm từ 87,3% xuống 65,3% khi nhiệt độ tăng từ 20°C lên 80°C. Như vậy, khi nhiệt độ tăng, lỗ rỗng nhỏ giảm, lỗ rỗng lớn tăng. Điều này cho thấy phân bố kích thước lỗ rỗng trong vật liệu thay đổi.

Sự biến đổi vi cấu trúc kéo theo thay đổi về tính chất cơ học. Đối với cường độ nén, bê tông dưỡng hộ ở nhiệt độ cao đạt cường độ sớm cao hơn. Cường độ ở tuổi 1 ngày tăng từ 32 MPa lên 45 MPa khi nhiệt độ tăng từ 20°C lên 80°C. Tuy nhiên, ở tuổi 90 ngày, cường độ lại giảm từ 66 MPa xuống 56 MPa. Điều này cho thấy cường độ tuổi sớm tăng, nhưng cường độ dài hạn giảm.

Đối với các chỉ tiêu động, mô đun đàn hồi và mô đun cắt đều giảm khi nhiệt độ dưỡng hộ tăng. Ở tuổi 90 ngày, so với 20°C, mức thay đổi tương đối của mô đun đàn hồi động là -0,03 tại 60°C và -0,06 tại 80°C; tương tự, mức thay đổi tương đối của mô đun cắt động là -0,01 và -0,023. Đồng thời, ứng suất cực đại của bê tông cũng có xu hướng giảm.

Các chỉ tiêu về độ bền lâu cũng thay đổi. Chiều sâu cacbonat hóa tăng từ 1,9 mm lên 2,5 mm trong điều kiện dưỡng hộ hơi nước. Độ bền băng giá giảm, trong khi tốc độ ăn mòn tăng. Việc bổ sung các phụ gia khoáng như tro bay, xỉ kết hợp phụ gia cuốn khí có thể cải thiện một phần các bất lợi này.

Ngoài ra, dưới tác động của nhiệt độ cao, các yếu tố như: trường nhiệt, ứng suất nhiệt và vùng tiếp giáp giữa các pha vật liệu đều thay đổi. Các hiện tượng như: biến dạng giãn nở, nứt giòn và thay đổi cấu trúc lỗ rỗng được ghi nhận.

Như vậy, khi tăng nhiệt độ dưỡng hộ để rút ngắn thời gian sản xuất, vật liệu không giữ nguyên trạng thái ban đầu. Cấu trúc bên trong thay đổi, kéo theo thay đổi về tính chất cơ học và độ bền lâu. Đây là cơ sở để xem xét các ảnh hưởng tiếp theo ở cấp độ kết cấu.

ẢNH HƯỞNG CỦA TRƯỜNG NHIỆT VÀ BIẾN DẠNG ĐẾN TRẠNG THÁI LÀM VIỆC CỦA KẾT CẤU

Những thay đổi ở cấp độ vật liệu không dừng lại trong cấu trúc bên trong bê tông, mà tiếp tục thể hiện ở cấp độ kết cấu. Khi vi cấu trúc thay đổi và tính chất cơ học giảm, kết cấu chịu tác động rõ hơn của nhiệt độ và biến dạng.

Đối với các cấu kiện có kích thước lớn như dầm hộp và tấm bản đường không đá ba lát, nhiệt độ trong tiết diện không phân bố đều. Trong giai đoạn đầu, nhiệt độ bê tông chịu tác động đồng thời của nhiệt thủy hóa và quá trình dưỡng hộ hơi nước. Với dầm hộp đúc sẵn 32 m, nhiệt độ đạt giá trị lớn nhất sau khoảng 72 giờ kể từ khi đổ bê tông. Vị trí nhiệt độ cao tập trung tại khu vực giao giữa bản cánh và bụng dầm.

Do nhiệt sinh ra trong quá trình thủy hóa và trao đổi nhiệt với môi trường dưỡng hộ, trong tiết diện hình thành trường nhiệt không đều. Khi nhiệt độ không đều, biến dạng cũng không đều. Vì vậy, ngay từ giai đoạn đầu, bê tông đã xuất hiện biến dạng nhiệt.

Trong giai đoạn khai thác dài hạn, ảnh hưởng của nhiệt độ tiếp tục tồn tại, nhưng nguồn nhiệt chuyển sang từ môi trường, chủ yếu là bức xạ mặt trời. Trong tiết diện dầm hộp, nhiệt độ phân bố không đều theo chiều cao. Gradient nhiệt độ theo chiều cao tiết diện có thể đạt khoảng 59,92°C/m vào tháng 4 và 62,70°C/m vào tháng 7.

Sự chênh lệch nhiệt độ theo chiều cao dẫn đến chênh lệch biến dạng. Khi các lớp trong tiết diện biến dạng khác nhau, nội ứng suất hình thành. Kết quả phân tích cho thấy biến dạng bê tông có thể vượt khoảng 1,07 lần biến dạng kéo cực hạn. Điều này cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ không còn là yếu tố nhỏ, mà có thể tác động trực tiếp đến trạng thái làm việc của kết cấu.

Đối với tấm bản đường không đá ba lát CRTS III, ảnh hưởng của nhiệt độ cũng xuất hiện theo cùng cơ chế. Ở giai đoạn đầu, nhiệt độ trong bản biến đổi chủ yếu trong

24 giờ sau khi đổ bê tông. Quá trình này bao gồm cả giai đoạn dưỡng hộ hơi nước và giai đoạn sau dưỡng hộ. Nhiệt độ tại tâm tấm bản có thể đạt khoảng 53°C, cao hơn so với các vị trí khác.

Trong giai đoạn này, bê tông chịu biến dạng nén do nhiệt độ tăng. Biến dạng nén tăng dần theo thời gian dưỡng hộ, phản ánh sự phát triển của trường nhiệt trong cấu kiện.

Trong giai đoạn dài hạn, dưới tác động của môi trường, tấm bản tiếp tục xuất hiện phân bố nhiệt độ không đều theo chiều cao. Gradient nhiệt độ theo chiều cao của tấm bản đạt khoảng 35,72°C/m vào tháng 7 và 14,42°C/m vào tháng 2. Biến dạng lớn nhất đạt khoảng 101×10^{-6}, tương đương 76,52% biến dạng kéo cực hạn.

Các kết quả này cho thấy, từ giai đoạn đầu đến giai đoạn khai thác, nhiệt độ luôn phân bố không đều trong cấu kiện. Khi nhiệt độ không đều, biến dạng không đều và nội ứng suất xuất hiện trong kết cấu. Điều này phản ánh mối liên hệ trực tiếp giữa đặc tính vật liệu và trạng thái làm việc của kết cấu bê tông trong điều kiện thực tế.

TỔ CHỨC THI CÔNG VÀ KIỂM SOÁT TRONG SẢN XUẤT, LẮP DỰNG CẤU KIỆN BÊ TÔNG ĐÚC SẴN

Các kết quả về trường nhiệt và biến dạng cho thấy nếu không kiểm soát tốt trong thi công, các ảnh hưởng bất lợi sẽ xuất hiện trong kết cấu. Vì vậy, khi áp dụng bê tông đúc sẵn và dưỡng hộ hơi nước, việc kiểm soát các thông số kỹ thuật trở thành điều kiện bắt buộc.

Trong xây dựng đường sắt tốc độ cao, tổ chức thi công được triển khai theo hướng tiêu chuẩn hóa và lặp lại theo dây chuyền. Cấu kiện được sản xuất trong nhà máy với quy trình cố định, sau đó vận chuyển ra hiện trường để lắp dựng. Cách làm này giúp kiểm soát vật liệu, nhiệt độ và thời gian thi công một cách ổn định.

Đối với dầm hộp đúc sẵn 32 m, quy trình sản xuất gồm các bước: lắp dựng cốt thép, đổ bê tông, dưỡng hộ hơi nước, tháo khuôn, căng cốt thép dự ứng lực và lưu kho. Trong quá trình này, các thông số kỹ thuật được kiểm soát chặt chẽ. Thời gian đổ bê tông được khống chế dưới 6 giờ. Bê tông sử dụng cấp C50. Cốt thép sử dụng các mác HRB400 và HRB500; cáp dự ứng lực được kiểm soát về chênh lệch mô đun đàn hồi trong cùng lô và giữa các lô sản xuất.

Trong giai đoạn dưỡng hộ, nhiệt độ được kiểm soát để hạn chế chênh lệch nhiệt trong tiết diện. Nhiệt độ dưỡng hộ không vượt quá 45°C, trong khi nhiệt độ bê tông không vượt quá 60°C. Chênh lệch nhiệt độ trong dầm được khống chế nhỏ hơn 15°C. Tháo khuôn được thực hiện khi bê tông đạt trên 60% cường độ thiết kế và các điều kiện chênh lệch nhiệt độ được bảo đảm. Quá trình căng kéo cốt thép dự ứng lực được thực hiện theo các giai đoạn: căng sơ bộ, căng ban đầu và căng cuối; trong đó căng ban đầu thực hiện khi bê tông đạt 80% cường độ thiết kế, còn căng cuối chỉ thực hiện khi cường độ và mô đun đàn hồi đạt 100% thiết kế, đồng thời tuổi bê tông không nhỏ hơn 10 ngày.

Đối với tấm bản đường không đá ba lát CRTS III, quy trình thi công gồm: chuẩn bị nền, lắp dựng cốt thép, căng trước, đổ bê tông tấm bản, dưỡng hộ nhiệt ẩm, lắp đặt tấm bản và thi công lớp bê tông tự lèn. Các thông số kỹ thuật chính được kiểm soát trong suốt quá trình thi công. Tỷ lệ nước/xi măng nhỏ hơn 0,35. Bê tông sử dụng cấp C60. Nhiệt độ đổ bê tông trong khoảng 5 - 30°C. Nhiệt độ môi trường thi công nhỏ hơn 40°C. Thời gian thi công một đợt nhỏ hơn 2 giờ. Việc giải phóng dự ứng lực và tháo khuôn được thực hiện sau khi bê tông đạt yêu cầu về cường độ và mô đun đàn hồi; sau tháo khuôn, tấm bản tiếp tục được dưỡng hộ nước ít nhất 3 ngày, với tổng thời gian giữ nhiệt và giữ ẩm không nhỏ hơn 10 ngày.

Trong giai đoạn dưỡng hộ của tấm bản, nhiệt độ bê tông được kiểm soát dưới 55°C, trong khi nhiệt độ dưỡng hộ dưới 45°C. Quá trình biến đổi nhiệt độ chủ yếu diễn ra trong 24 giờ đầu sau khi đổ bê tông. Đây là giai đoạn quan trọng, vì trường nhiệt hình thành và ảnh hưởng trực tiếp đến biến dạng của cấu kiện. Việc kiểm soát nhiệt độ và thời gian thi công nhằm hạn chế chênh lệch nhiệt và giảm biến dạng không đồng đều.

Ngoài các cấu kiện chính, các cấu kiện đúc sẵn khác như: tà vẹt bê tông hai khối, tấm chắn, lan can và hệ thống thoát nước cũng được sản xuất theo phương thức công nghiệp. Tà vẹt hai khối sử dụng bê tông C60 và yêu cầu kháng băng giá đạt cấp F300.

Như vậy, khi áp dụng công nghệ bê tông đúc sẵn và dưỡng hộ hơi nước, thi công không chỉ là lắp dựng cấu kiện, mà là quá trình kiểm soát đồng bộ các yếu tố vật liệu, nhiệt độ và thời gian. Việc tiêu chuẩn hóa quy trình và kiểm soát chặt chẽ các thông số là điều kiện để bảo đảm chất lượng cấu kiện trong điều kiện sản xuất và thi công quy mô lớn.

Tóm lại, công nghệ cấu kiện bê tông đúc sẵn kết hợp với dưỡng hộ nhiệt ẩm giúp rút ngắn thời gian sản xuất, nâng cao mức độ công nghiệp hóa và đáp ứng yêu cầu thi công quy mô lớn của đường sắt tốc độ cao. Tuy nhiên, quá trình dưỡng hộ ở nhiệt độ cao có thể làm thay đổi vi cấu trúc, tính chất cơ học, độ bền lâu và trường nhiệt trong cấu kiện. Do đó, việc áp dụng công nghệ này cần đi kèm với kiểm soát đồng bộ từ vật liệu, cấp phối, chế độ dưỡng hộ, chênh lệch nhiệt độ đến quy trình căng kéo, tháo khuôn và dưỡng hộ sau nhiệt.

Đối với Việt Nam, trong quá trình nghiên cứu và chuẩn bị phát triển đường sắt tốc độ cao, kinh nghiệm này cho thấy công nghệ cấu kiện bê tông đúc sẵn không chỉ là giải pháp rút ngắn tiến độ, mà còn là một hệ thống kỹ thuật đòi hỏi năng lực kiểm soát vật liệu, cấp phối, chế độ dưỡng hộ, chênh lệch nhiệt độ, quy trình sản xuất và điều kiện khai thác. Nếu không kiểm soát tốt, các ảnh hưởng bất lợi từ nhiệt độ và biến dạng có thể xuất hiện trong quá trình sử dụng lâu dài.

(Bài viết được biên tập, lược dịch từ tham luận của tác giả tại hội thảo quốc tế "Công nghiệp hóa xây dựng với giải pháp lắp ghép cấu kiện bê tông đúc sẵn", do Hiệp hội Bê tông Việt Nam tổ chức ngày 20/4/2026)

CÔNG NGHỆ PHỤ GIA CHO SẢN XUẤT CẤU KIỆN BÊ TÔNG ĐÚC SẴN - LẮP GHÉP:

Hướng tới cường độ sớm, giảm dưỡng hộ nhiệt và phát thải CO_2

> TS YU CHENG*

Giải pháp bê tông lắp ghép cho các dự án đường sắt tốc độ cao và công trình hầm đòi hỏi tiếp cận mới từ vật liệu để bảo đảm hiệu quả tổng thể.

Trong sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn - lắp ghép cho các dự án hạ tầng quy mô lớn như: đường sắt tốc độ cao và công trình hầm, yêu cầu tháo khuôn sớm, tăng vòng quay khuôn và bảo đảm tiến độ khiến cường độ sớm trở thành yếu tố then chốt. Dưỡng hộ nhiệt ẩm thường được sử dụng để đáp ứng yêu cầu này, nhưng đang bộc lộ hạn chế về năng lượng, chi phí và phát thải CO_2. Điều đó đặt ra nhu cầu phát triển các giải pháp vật liệu và phụ gia nhằm kiểm soát quá trình thủy hóa, nâng cao cường độ sớm và giảm phụ thuộc vào dưỡng hộ nhiệt.

Áp lực rút ngắn tiến độ, gia tăng quy mô cấu kiện và yêu cầu giảm phát thải đang đồng thời đặt ra những thách thức mới đối với bê tông đúc sẵn - lắp ghép trong các dự án hạ tầng quy mô lớn, đặc biệt là đường sắt tốc độ cao và công trình hầm. Trong bối cảnh đó, vật liệu bê tông không chỉ phải đạt cường độ cao mà còn phải bảo đảm tính công tác và độ ổn định trong quá trình thi công. Điều này buộc phải có những giải pháp mới, trong đó phụ gia không chỉ đóng vai trò hỗ trợ thi công mà còn trở thành công cụ quan trọng để kiểm soát tính lưu biến, quá trình thủy hóa, cường độ sớm, co ngót - nứt và độ bền lâu của bê tông.

ĐIỂM NGHẼN CỦA TIẾN ĐỘ VÀ PHÁT THẢI

Trong sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn - lắp ghép, yêu cầu phát triển cường độ sớm là yếu tố then chốt. Cường độ đạt càng nhanh thì thời gian tháo khuôn càng ngắn, vòng quay khuôn càng cao, năng suất nhà máy càng lớn. Với các cấu kiện như bản bê tông đường sắt không đá ba lát, dầm hộp, đốt (segment) hầm, việc rút ngắn thời gian từ khi đổ bê tông đến khi tháo khuôn có ý nghĩa quyết định đối với tiến độ thi công toàn tuyến.

Hiện nay, cách phổ biến để đạt cường độ sớm là dưỡng hộ nhiệt ẩm. Tuy nhiên, phương pháp này tiêu tốn năng lượng lớn và phát thải cao. Theo số liệu từ nghiên cứu thực nghiệm, riêng với bản bê tông đường sắt không đá ba lát, năng lượng tiêu thụ cho dưỡng hộ có thể lên tới khoảng 7,8 kg than tiêu chuẩn tương đương cho mỗi m^3 bê tông, tương đương khoảng 19,16 kg CO_2/m^3. Với quy mô hàng trăm nghìn đến hàng triệu m^3 bê tông trong các dự án đường sắt tốc độ cao, lượng phát thải này là rất lớn.

Không chỉ vậy, khi chuyển sang sử dụng khí tự nhiên thay thế than, chi phí dưỡng hộ có thể tăng từ 2 - 4 lần. Điều này khiến dưỡng hộ nhiệt trở thành một "điểm nghẽn kép": vừa gây áp lực chi phí, vừa không phù hợp với yêu cầu giảm phát thải.

Nói cách khác, cường độ sớm hiện nay đạt được do "tiêu tốn năng lượng". Đây là mô hình không còn phù hợp khi yêu cầu vừa phải đẩy nhanh quá trình thi công, vừa phải giảm phát thải.

CẤU KIỆN LỚN HƠN, BÊ TÔNG "KHÓ TÍNH" HƠN

Song song với áp lực về năng lượng là áp lực về quy mô cấu kiện ngày càng lớn. Trong các dự án đường sắt tốc độ cao và công trình hầm, cấu kiện bê tông đúc sẵn - lắp ghép đang có xu hướng tăng nhanh về kích thước, với các ví dụ như dầm hộp dài 40 m, tấm vỏ hầm cho máy đào khiên có đường kính tới khoảng 15,5 m và các bản bê tông đường sắt diện tích lớn. Khi quy mô cấu kiện tăng, bê tông không chỉ cần đạt cường độ cao mà còn phải có tính công tác tốt, khả năng điền đầy khuôn ổn định, hạn

(*) *Công ty Vật liệu mới Sobute, Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về vật liệu công trình hạ tầng quy mô lớn (Trung Quốc)*

chế phân tầng - tách nước và bảo đảm chất lượng bề mặt sau hoàn thiện.

Trước hết là vấn đề tính công tác của hỗn hợp bê tông. Hỗn hợp bê tông phải có độ lưu động và khả năng điền đầy khuôn phù hợp, đặc biệt trong các cấu kiện có mật độ cốt thép dày hoặc hình dạng phức tạp. Đồng thời, hỗn hợp vẫn phải giữ được độ ổn định, không bị phân tầng, tách nước hoặc mất độ đồng nhất. Nếu tính công tác không được kiểm soát tốt, cấu kiện sau khi tháo khuôn có thể xuất hiện rỗ bề mặt, lỗ rỗng bên trong hoặc vùng bê tông không đặc chắc, làm suy giảm chất lượng và độ bền lâu của sản phẩm.

Tiếp theo là yêu cầu về cường độ. Các cấu kiện bê tông đúc sẵn - lắp ghép thường sử dụng bê tông từ C40 - C60 đối với cọc bê tông, cột điện bê tông; cọc PHC hoặc các cấu kiện chịu lực cao, cấp cường độ có thể từ C60 trở lên; và riêng một số ứng dụng PHC có thể đạt C80 - C105. Cường độ cao đồng nghĩa với giảm tỷ lệ nước/chất kết dính, tăng hàm lượng chất kết dính, tăng độ nhớt, làm hỗn hợp bê tông khó thi công hơn.

Quan trọng hơn, bê tông đúc sẵn - lắp ghép đáp ứng ba yêu cầu đồng thời: tính công tác tốt (để thi công); cường độ sớm (để tháo khuôn nhanh); ổn định lâu dài (để bảo đảm độ bền lâu). Ba yếu tố này thường mâu thuẫn với nhau. Đây chính là "nút thắt kỹ thuật" của bê tông đúc sẵn - lắp ghép hiện đại.

KIỂM SOÁT LƯU BIẾN: ĐIỀU KIỆN TIÊN QUYẾT CỦA CHẤT LƯỢNG

Thực tế cho thấy, chất lượng cấu kiện lắp ghép không bắt đầu từ cường độ, mà bắt đầu từ khả năng thi công của hỗn hợp bê tông. Nếu tính công tác không được kiểm soát phù hợp, bê tông khó điền đầy khuôn và dễ phát sinh rỗ, phân tầng hoặc khuyết tật bề mặt, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến cường độ, độ bền lâu và chất lượng cấu kiện.

Trong các nghiên cứu gần đây, việc kiểm soát tính lưu biến được coi là bước đầu tiên. Các cơ chế như hấp phụ chọn lọc giúp cải thiện đáng kể độ lưu động ban đầu của hỗn hợp bê tông, có thể tăng hơn đáng kể so với cấp phối thông thường, đặc biệt khi sử dụng các vật liệu phức tạp như tro bay, cát nhân tạo.

Tuy nhiên, vấn đề không chỉ là "tính công tác tốt", mà là "tính công tác ổn định theo thời gian". Trong điều kiện thực tế, hỗn hợp bê tông có thể suy giảm độ lưu động sau 30 - 60 phút do quá trình thủy hoá. Công nghệ giải phóng có kiểm soát cho phép phụ gia phát huy tác dụng theo từng giai đoạn, nhờ đó kéo dài thời gian duy trì độ lưu động thêm khoảng 2 giờ trong điều kiện 40°C, đáp ứng yêu cầu vận chuyển xa và thi công trong điều kiện nhiệt độ cao.

Ở quy mô lớn, vấn đề tiếp theo là khả năng bơm. Với bê tông cường độ cao, độ nhớt lớn khiến việc bơm trở nên khó khăn. Phụ gia giảm độ nhớt kết hợp kiểm soát cấu trúc đã cho phép bê tông đạt khả năng bơm tới 800 m, đồng thời vẫn giữ được độ ổn định, không phân tầng và có khả năng tự lèn.

Ba nhóm giải pháp: tạo độ lưu động, duy trì độ lưu động, và bảo đảm thi công, tạo thành nền tảng để bê tông đúc sẵn - lắp ghép có thể vận hành ở quy mô công nghiệp.

Thay thế dưỡng hộ nhiệt bằng kiểm soát vật liệu

Trọng tâm của bài toán vẫn là cường độ sớm. Thay vì sử dụng nhiệt, các nghiên cứu hiện nay tập trung vào việc điều khiển quá trình thủy hoá của xi măng ở cấp vi mô.

Một hướng tiếp cận là sử dụng vật liệu nano C-S-H được ổn định bằng polymer, trong đó các hạt nano đóng vai trò như "mầm kết tinh" để thúc

đẩy quá trình thủy hóa xi măng và cải thiện cường độ rất sớm. Kết quả cho thấy, cường độ nén và uốn ở 8 giờ có thể tăng lần lượt khoảng 108% và 121%, cho thấy tiềm năng rút ngắn thời gian đạt cường độ sớm trong sản xuất cấu kiện đúc sẵn mà không cần phải dưỡng hộ nhiệt ẩm.

Bên cạnh đó, các phụ gia chức năng có khả năng thúc đẩy nhanh quá trình hòa tan khoáng clanhke cũng được sử dụng như một dạng "xúc tác" hóa học. Nhờ đó, bê tông có thể phát triển cường độ nhanh trong 24 - 72 giờ đầu, đồng thời vẫn duy trì cường độ lâu dài.

Quan trọng hơn, các phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate thế hệ mới (PCE) được thiết kế ở cấp độ phân tử, cho phép vừa duy trì độ lưu động, vừa thúc đẩy cường độ sớm. Đây là bước tiến quan trọng nhằm giải quyết mâu thuẫn giữa yêu cầu duy trì tính công tác của hỗn hợp bê tông và yêu cầu phát triển cường độ sớm của cấu kiện.

Các kết quả thực nghiệm và ứng dụng cho thấy, với các hệ bê tông cường độ cao, có thể rút ngắn thời gian đạt cường độ sớm và giảm phụ thuộc vào dưỡng hộ nhiệt, trong khi vẫn bảo đảm tính ổn định và chất lượng cấu kiện.

TỪ KINH NGHIỆM SANG MÔ HÌNH

Một vấn đề lớn khác của bê tông đúc sẵn - lắp ghép là

nứt do co ngót. Các cơ chế co ngót như co ngót nhiệt, co ngót tự sinh và co ngót khô thường xảy ra đồng thời, dẫn đến nguy cơ nứt cao, đặc biệt với cấu kiện lớn.

Thay vì dựa vào kinh nghiệm, các nghiên cứu đã xây dựng mô hình dự báo rủi ro nứt dựa trên các yếu tố như thủy hoá, nhiệt độ, độ ẩm, biến dạng và điều kiện ràng buộc. Hệ số rủi ro nứt η được sử dụng để đánh giá khả năng nứt, trong đó $\eta \leq 0,7$ được coi là an toàn.

Trên cơ sở đó, phương pháp thiết kế bê tông chống nứt được xây dựng theo hướng tích hợp nhiều yếu tố: vật liệu, môi trường, kết cấu và quy trình thi công. Cách tiếp cận này cho phép điều chỉnh ngay từ giai đoạn thiết kế, thay vì xử lý khi sự cố đã xảy ra.

Song song, các hệ vật liệu giảm co ngót, bao gồm phụ gia bù co và phụ gia giảm co ngót, giúp giảm khoảng 20% co ngót khô và 15% co ngót nhiệt, góp phần kiểm soát nứt trong toàn bộ quá trình.

HƯỚNG PHÁT TRIỂN CHO KẾT CẤU HIỆU NĂNG CAO

Ở cấp độ cao hơn, bê tông siêu tính năng (UHPC) đang mở ra hướng tiếp cận mới cho các công trình hạ tầng. Với cường độ nén từ 120 MPa trở lên, thậm chí có thể đạt đến 228 MPa trong điều kiện dưỡng hộ thường, do đó cho phép giảm đáng kể kích thước và trọng lượng kết cấu.

Ngoài cường độ cao, UHPC có mô đun đàn hồi lớn (khoảng 70 GPa) và hệ số từ biến thấp (dưới 0,4), giúp giảm biến dạng và tăng ổn định lâu dài. Khi kết hợp với sợi thép và polymer, vật liệu này còn có khả năng chịu kéo tốt hơn, tăng cường độ dẻo và hạn chế lan truyền vết nứt.

Trong thực tế, việc sử dụng UHPC chế tạo bản mặt cầu đã giúp giảm khoảng 20% lượng thép, 30% trọng lượng kết cấu và giảm đáng kể phát thải CO_2, với mức giảm phát thải được báo cáo tới khoảng 25.000 tấn CO_2 trong ví dụ ứng dụng.

CẦU NỐI GIỮA KỸ THUẬT VẬT LIỆU VÀ YÊU CẦU CHÍNH SÁCH

Từ các phân tích trên có thể thấy, một trong những điểm quan trọng của bê tông đúc sẵn - lắp ghép hiện đại nằm ở thiết kế vật liệu, đặc biệt là khả năng kiểm soát đồng thời tính công tác, cường độ sớm và nguy cơ nứt. Nếu không giải quyết được bài toán vật liệu, đặc biệt là cường độ sớm và kiểm soát nứt, thì không thể đạt được cả tiến độ và mục tiêu giảm phát thải.

Các giải pháp hiện nay cho thấy một hướng đi rõ ràng: thay thế năng lượng bằng kiểm soát vật liệu. Thay vì dưỡng hộ nhiệt để đạt cường độ, cần thiết kế vật liệu để thúc đẩy phản ứng sớm hơn. Thay vì xử lý nứt bằng kinh nghiệm, cần dự báo và kiểm soát bằng mô hình. Thay vì sử dụng vật liệu đơn chức năng, cần phát triển phụ gia đa chức năng, tích hợp nhiều vai trò.

Đây chính là điểm giao giữa kỹ thuật và chính sách. Giảm phát thải không chỉ là vấn đề năng lượng, mà là vấn đề thiết kế vật liệu. Tăng năng suất không chỉ là tổ chức thi công, mà là khả năng phát triển cường độ sớm của bê tông.

Các dự án đường sắt tốc độ cao thường có khối lượng cấu kiện lớn, yêu cầu tiến độ cao và áp lực giảm phát thải ngày càng rõ, việc chuyển đổi cách tiếp cận vật liệu là điều cần thiết. Đây không còn là lựa chọn công nghệ, mà là một điều kiện quan trọng để triển khai hiệu quả các dự án hạ tầng quy mô lớn trong giai đoạn tới.❖

(Bài viết được biên tập, lược dịch từ tham luận của tác giả tại hội thảo quốc tế "Công nghiệp hóa xây dựng với giải pháp lắp ghép cấu kiện bê tông đúc sẵn", do Hiệp hội Bê tông Việt Nam tổ chức ngày 20/4/2026)

TS LÊ QUANG HÙNG:

Ngành Xây dựng **mở đường và dẫn dắt tăng trưởng** trong kỷ nguyên mới

NGỌC HÀ (thực hiện)

Việt Nam đang đứng trước ngưỡng cửa của một giai đoạn lịch sử quan trọng. Mục tiêu tăng trưởng GDP bình quân trên 10% giai đoạn 2026 - 2030 không chỉ là một con số kinh tế, mà là một mệnh lệnh chiến lược để đưa đất nước thoát khỏi bẫy thu nhập trung bình. Trong bối cảnh đó, ngành Xây dựng không còn đóng vai trò "hỗ trợ" đơn thuần, mà đã trở thành ngành kinh tế mũi nhọn, đi trước mở đường và dẫn dắt dòng vốn đầu tư.

BTV Tạp chí Xây dựng đã có cuộc trò chuyện với TS Lê Quang Hùng - Chủ tịch Hội Bê tông Việt Nam, nguyên Thứ trưởng Bộ Xây dựng. Cuộc trò chuyện không chỉ dừng lại ở những con số, mà còn đi sâu vào những chuyển biến về công nghệ, quản trị và tầm nhìn tương lai.

VỊ THẾ DẪN DẮT CỦA NGÀNH XÂY DỰNG VÀ BÀI TOÁN HIỆU QUẢ ĐẦU TƯ

Thưa ông, trong các báo cáo kinh tế vĩ mô, ngành Xây dựng thường được mô tả là "cỗ máy kéo". Dưới góc độ khoa học kinh tế, ông có thể phân tích rõ hơn về khả năng dẫn dắt tăng trưởng của ngành này khi Việt Nam đặt mục tiêu GDP tăng trên 10%?

- Chúng ta cần nhìn nhận thực tế: Không có một quốc gia nào phát triển mà không trải qua giai đoạn bùng nổ hạ tầng. Ngành Xây dựng hiện đóng góp khoảng 20 - 25% GDP, nhưng con số này chưa phản ánh hết vai trò thực sự của nó. Xây dựng là ngành có hệ số lan tỏa (multiplier effect) cực lớn. Khi một đồng vốn đầu tư công đổ vào hạ tầng, nó sẽ kích thích từ 1,5 - 2 đồng vốn từ khu vực tư nhân và các ngành phụ trợ như thép, xi măng, dịch vụ logistics, bất động sản…

Đại hội Đảng lần thứ XIV đã định hình rõ: Năm 2030 là mốc trở thành nước đang phát triển có công nghiệp hiện đại. Để đạt GDP đầu người 8.500 USD, chúng ta cần một "cú hích" đủ mạnh để thay đổi diện mạo quốc gia. Hạ tầng chính là "hệ tuần hoàn" của nền kinh tế. Nếu mạch máu giao thông tắc nghẽn, các ngành sản xuất và dịch vụ không thể lưu thông hiệu quả.

Khi Chính phủ đẩy mạnh đầu tư công vào các dự án hạ tầng lớn như Sân bay Long Thành hay Cao tốc Bắc - Nam, dòng tiền không chỉ nằm ở khối lượng bê tông, cốt thép mà nó ngay lập tức chuyển hóa thành thu nhập cho hàng triệu lao động, lợi nhuận cho doanh nghiệp cung ứng và tạo ra "vốn mồi" để thu hút FDI. Một quốc gia muốn tăng trưởng 10% mà hạ tầng chỉ tăng trưởng 5 - 6% là điều bất khả thi về mặt vật lý. Hạ tầng phải đi trước một bước, với tốc độ tăng trưởng phải đạt ít nhất 12 - 15% để bù đắp các nút thắt.

Nhìn vào bản đồ hạ tầng hiện nay, chúng ta thấy một sự chuyển mình chưa từng có với những dự án chiến lược quan trọng.

Dự án Đường bộ cao tốc Bắc - Nam phía Đông sẽ là trục "xương sống" quốc gia với tổng chiều dài hơn 2.000 km. Việc thông tuyến toàn bộ vào năm 2025 - 2026 sẽ rút ngắn thời gian vận chuyển hàng hóa, giảm chi phí vận tải xuống mức tối thiểu.

Cảng hàng không quốc tế Long Thành tương lai gần là một "siêu cảng" với công suất 100 triệu hành khách/năm. Đây không chỉ là một công trình xây dựng, mà là một "thành phố sân bay", một trung tâm trung chuyển quốc tế giúp Việt Nam cạnh tranh trực tiếp với Changi (Singapore) hay Suvarnabhumi (Thái Lan).

Để dẫn dắt tăng trưởng, những "con sếu đầu đàn" như Đèo Cả, Viettel Construction, Coteccons, Hòa Bình… phải tiếp tục chuyển mình từ "nhà thầu xây lắp" sang "nhà phát triển dự án" và "nhà đầu tư hạ tầng".

TS Lê Quang Hùng

Dự án Đường sắt tốc độ cao trục Bắc - Nam với tổng mức đầu tư dự kiến hơn 67 tỷ USD mang tính biểu tượng của kỷ nguyên mới. Nó đòi hỏi năng lực xây lắp ở trình độ hoàn toàn khác - trình độ của công nghệ đường sắt hiện đại nhất thế giới.

Có một thực tế là chúng ta đầu tư rất nhiều nhưng hiệu quả chưa tương xứng. Chỉ số ICOR của Việt Nam vẫn ở mức cao so với khu vực. Ông nhìn nhận vấn đề này như thế nào?

- Đúng vậy, đây là một điểm nghẽn về quản trị. Chỉ số ICOR (Incremental Capital-Output Ratio) đo lường lượng vốn cần thiết để tạo ra một đơn vị tăng trưởng. Số liệu giai đoạn 2021 - 2025 cho thấy Chỉ số ICOR của Việt Nam là 6,4; Indonesia là 5,2; Malaysia là 4,5; Thái Lan là 4,2…

Chỉ số 6,4 cho thấy chúng ta đang phải "trả giá" đắt hơn để có được sự tăng trưởng. Tôi cho rằng có nhiều nguyên nhân.

Thứ nhất về thủ tục hành chính. Quy trình phê duyệt dự án kéo dài làm đội vốn và mất cơ hội kinh doanh.

Thứ hai là công tác giải phóng mặt bằng. Đây là "nút thắt của các nút thắt". Nhiều dự án hạ tầng lớn như các tuyến vành đai tại Hà Nội và TP.HCM bị chậm tiến độ hàng năm trời chỉ vì mặt bằng.

Thứ ba là về năng lực quản lý dự án. Chúng ta thiếu đội ngũ quản trị dự án chuyên nghiệp theo tiêu chuẩn quốc tế, dẫn đến việc điều phối nguồn lực bị chồng chéo.

Để đạt mục tiêu 2030, ngành Xây dựng phải tiên phong trong việc kéo ICOR xuống mức dưới 5,0 thông qua quản trị số và quy hoạch tích hợp.

Nhiều ý kiến cho rằng đầu tư vào xây dựng chỉ là giải pháp tình thế để kích cầu. Dưới góc độ khoa học kinh tế, ông đánh giá thế nào về tính bền vững của việc lấy ngành Xây dựng làm động lực dẫn dắt?

- Đây là một cách nhìn nhận chưa đầy đủ. Nếu sử dụng Mô hình Input-Output của Leontief, chúng ta sẽ thấy ngành Xây dựng có Hệ số lan tỏa (Multiplier Effect) thuộc hàng cao nhất trong nền kinh tế.

Ngành Xây dựng tiêu thụ sản phẩm của hơn 50 ngành kinh tế khác nhau. Khi giá trị sản xuất ngành Xây dựng tăng thêm 1 đơn vị, nó sẽ kích thích nhu cầu trung gian của các ngành khác tăng thêm khoảng 1,8 - 2,1 đơn vị.

Tại Việt Nam, cứ mỗi 1% tăng trưởng của ngành Xây dựng sẽ đóng góp trực tiếp khoảng 0,2 - 0,25% vào tăng trưởng GDP chung. Tuy nhiên, tác động gián tiếp thông qua việc

hình thành tài sản cố định cho xã hội mới là giá trị dài hạn.

Chúng ta không "đào đường rồi lấp lại" để tạo GDP ảo. Chúng ta đang chuyển hóa vốn tài chính thành vốn hạ tầng. Khi cao tốc thông, chi phí vận tải giảm, giá thành sản phẩm giảm, sức cạnh tranh của nền kinh tế tăng lên. Đó là sự dẫn dắt mang tính hữu cơ.

Ngoài ra, Việt Nam hiện có chi phí logistics tương đối cao, khoảng 18 - 20% GDP, trong khi mức bình quân quốc tế chỉ khoảng 11 - 12%. Điều này làm tăng giá thành sản phẩm và giảm sức cạnh tranh của nền kinh tế. Muốn giảm chi phí logistics thì hạ tầng giao thông phải được đầu tư đồng bộ và hiệu quả hơn.

Ông từng nhắc đến chỉ số ICOR. Làm thế nào để ngành Xây dựng giúp tối ưu hóa chỉ số này cho Việt Nam?

- Hiện nay, ICOR của Việt Nam đang ở mức khoảng 6,4 - cao hơn đáng kể so với các nước đang phát triển hiệu quả (thường dưới 4,0). Ngành Xây dựng có thể kéo chỉ số này xuống bằng hai cách:

Một là rút ngắn thời gian thi công. Một dự án chậm tiến độ 1 năm sẽ làm "vốn nằm chết", không tạo ra giá trị thặng dư trong khi lãi vay vẫn phát sinh.

Hai là quy hoạch tích hợp, tránh tình trạng hạ tầng chồng chéo, "đầu tư phân tán". Việc tập trung nguồn lực vào các "siêu dự án" như Sân bay Long Thành hay Đường sắt tốc độ cao chính là cách để tạo ra điểm bùng phát kinh tế (Economic Tipping Point).

THÁCH THỨC VỀ NHÂN LỰC VÀ NĂNG LỰC CỦA DOANH NGHIỆP VIỆT

Ông đánh giá như thế nào về năng lực của doanh nghiệp xây dựng Việt Nam trước yêu cầu mới của đất nước?

- Thị trường xây dựng Việt Nam hiện phát triển rất mạnh. Đối với doanh nghiệp xây lắp, về cơ bản đã đáp ứng khoảng 90% nhu cầu thị trường trong nước. Tuy nhiên, dù khối lượng công việc lớn nhưng lợi nhuận của doanh nghiệp xây lắp vẫn thấp.

Trước đây, các cầu dây văng lớn hay hầm xuyên núi đều phải thuê nhà thầu ngoại (Nhật Bản, Hàn Quốc, Pháp). Hiện nay, Việt Nam đã có những "con sếu đầu đàn" như Đèo Cả, Viettel Construction, Coteccons, Hòa Bình… đã có thể đảm đương những công trình khó nhất. Nhưng, để dẫn dắt tăng trưởng, các doanh nghiệp này phải tiếp tục chuyển mình từ "nhà thầu xây lắp" sang "nhà phát triển dự án" và "nhà đầu tư hạ tầng".

Hiện nay, khoảng 30% thị phần tư vấn các dự án phức tạp vẫn nằm trong tay các tập đoàn nước ngoài. Để đạt mục tiêu 2030, chúng ta cần đào tạo được đội ngũ kỹ sư không chỉ giỏi kỹ thuật mà còn phải am hiểu luật pháp quốc tế, tiêu chuẩn Eurocodes và quản trị số.

Con số thống kê cho thấy, năng suất lao động ngành Xây dựng Việt Nam vẫn thấp, chủ yếu dựa vào thâm dụng lao động thủ công. Ví dụ năm 2025, năng suất bình quân chỉ là 240 triệu đ/người. Tại sao năng suất lao động ngành Xây dựng Việt Nam vẫn thấp so với khu vực, thưa ông?

- Tôi cho rằng chúng ta cần một cuộc cách mạng về thiết bị thi công tự động hóa, robot xây dựng và các phần mềm quản trị ERP chuyên dụng để kéo con số này lên gấp 2 - 3 lần trong 5 năm tới.

Có ba nguyên nhân chính cần khắc phục:

Lực lượng lao động không chính thức: Khoảng 70 - 80% lao động trên các công trường hiện nay là lao động thời vụ, chưa qua đào tạo bài bản. Họ làm việc dựa trên kinh nghiệm truyền khẩu thay vì quy trình kỹ thuật.

Mức độ cơ giới hóa thấp: Chúng ta vẫn sử dụng quá nhiều sức người ở những khâu lẽ ra máy móc phải làm (như uốn thép, trộn vữa, vận chuyển vật liệu nhỏ).

Quản trị công trường lạc hậu: Việc điều phối vật tư và nhân lực thường bị ngắt quãng, dẫn đến thời gian "chết" trên công trường rất lớn.

Để cải thiện vấn đề này, chúng ta buộc phải thực hiện "chuẩn hóa kỹ năng" lao động xây dựng. Mỗi công nhân phải có chứng chỉ nghề nghiệp thực thụ. Bên cạnh đó, việc áp dụng các mô hình quản trị tinh gọn (Lean Construction) sẽ giúp loại bỏ lãng phí trong mọi khâu thi công.

CÔNG NGHỆ VẬT LIỆU MỚI VÀ KỶ NGUYÊN BÊ TÔNG XANH

Với vai trò Chủ tịch Hội Bê tông Việt Nam, ông đánh giá thế nào về yêu cầu chuyển đổi xanh đối với ngành Xây dựng?

- Đây là yêu cầu bắt buộc nếu Việt Nam muốn phát triển bền vững. Ngành vật liệu xây dựng là lĩnh vực tiêu hao rất nhiều năng lượng và phát thải CO_2 lớn. Riêng ngành xi măng

đã chiếm tỷ trọng phát thải đáng kể.

Theo định hướng hiện nay, đến năm 2030 ngành Xây dựng phải giảm khoảng 73 triệu tấn CO_2 quy đổi, riêng lĩnh vực vật liệu xây dựng là 50 triệu tấn CO_2 quy đổi. Đây là nhiệm vụ rất khó khăn.

Muốn thực hiện được, chúng ta phải phát triển vật liệu xanh, vật liệu không nung, tái chế tro xỉ, sử dụng năng lượng tiết kiệm và tăng hiệu quả sử dụng tài nguyên.

Bên cạnh đó, cần thúc đẩy công trình xanh và đô thị xanh. Một tòa nhà tiết kiệm năng lượng không chỉ giảm phát thải mà còn giảm chi phí vận hành trong nhiều thập kỷ.

Tôi cho rằng, trong tương lai gần, tiêu chuẩn xanh sẽ trở thành điều kiện bắt buộc để doanh nghiệp tham gia thị trường quốc tế và tiếp cận nguồn vốn xanh toàn cầu.

Theo ông, sự chuyển dịch trong ngành vật liệu xây dựng, đặc biệt là bê tông - loại vật liệu chiếm tỷ trọng lớn nhất, sẽ như thế nào?

- Bê tông là "thực phẩm" của ngành Xây dựng. Dự báo đến năm 2030, nhu cầu bê tông sẽ đạt khoảng 200 triệu m3. Tuy nhiên, phương thức sản xuất truyền thống đang đối mặt với áp lực môi trường khủng khiếp.

Chúng ta đang thúc đẩy mạnh mẽ 3 trụ cột:

Cấu kiện hóa và Lắp ghép (Precast): Hiện tỷ lệ lắp ghép của Việt Nam chỉ đạt 15 - 20%. Mục tiêu đến 2030 phải đạt trên 35%. Việc đúc sẵn tại nhà máy giúp kiểm soát chất lượng tuyệt đối, giảm 30% thời gian thi công và hạn chế tối đa rác thải công trường.

Bê tông cường độ cao (HPC): Cho phép giảm kích thước cấu kiện, tiết kiệm tài nguyên thiên nhiên nhưng vẫn đảm bảo khả năng chịu lực cho các tòa nhà siêu cao tầng hoặc các nhịp cầu lớn.

Sử dụng tro xỉ nhiệt điện: Việt Nam có lượng tro xỉ từ các nhà máy nhiệt điện rất lớn. Việc tái chế tro xỉ làm phụ gia cho xi măng và bê tông không chỉ giải quyết bài toán môi trường mà còn giúp giảm giá thành sản phẩm.

Ở các nước phát triển như Nhật Bản tỷ lệ Precast (bê tông đúc sẵn) trong xây dựng đạt trên 40%. Ở Việt Nam, chúng ta vẫn chủ yếu đổ bê tông tại chỗ (in-situ), phụ thuộc vào thời tiết, sẽ khiến hao hụt vật liệu lớn, chất lượng không đồng đều. Theo tôi, thời gian tới, ngành Xây dựng phải chuyển dịch mạnh sang mô hình "xây dựng tại nhà máy, lắp ráp tại công trường". Điều này không chỉ tăng năng suất lao động lên 2 - 3 lần mà còn giúp kiểm soát chặt chẽ các chỉ số môi trường.

CHUYỂN ĐỔI SỐ - TỪ BẢN VẼ GIẤY ĐẾN "BẢN SAO SỐ"

Chuyển đổi số thường được nhắc đến như một "phép màu". Trong ngành Xây dựng, việc này đang diễn ra ra sao thưa ông?

- Chuyển đổi số không phải là trào lưu, đó là sự sinh tồn. Công cụ cốt lõi ở đây chính là BIM.

BIM không chỉ là bản vẽ 3D. Nó là một hệ thống quản lý thông tin xuyên suốt vòng đời công trình:

- BIM 4D: Tích hợp tiến độ thi công.
- BIM 5D: Tích hợp chi phí và dự toán.
- BIM 6D/7D: Quản lý vận hành và bền vững môi trường.

Lộ trình áp dụng BIM bắt buộc đối với các dự án sử dụng

MỘT SỐ MỐC QUAN TRỌNG ĐẾN NĂM 2030

Lĩnh vực	Mục tiêu/Chỉ tiêu	Trạng thái hiện tại (2025-2026)
Đường bộ cao tốc	5.000 km	~2.200 km
Đường sắt tốc độ cao	Khởi công toàn tuyến Bắc - Nam	Đang hoàn thiện báo cáo tiền khả thi
Nhà ở xã hội	1 triệu căn hộ	Đang triển khai mạnh mẽ các gói tín dụng
Giảm phát thải CO_2	50 triệu tấn	Đang thực hiện kiểm kê khí nhà kính
Tỷ lệ đô thị hóa	Trên 50%	~43%

vốn đầu tư công đã được Chính phủ phê duyệt. Điều này sẽ giúp giảm thiểu sai sót trong thiết kế, tránh tình trạng "vừa làm vừa sửa" - vốn là nguyên nhân gây lãng phí hàng ngàn tỷ đồng mỗi năm.

BIM cho phép chúng ta xây dựng một "bản sao số" của công trình trên máy tính trước khi đặt viên gạch đầu tiên. Nghiên cứu của Stanford cho thấy áp dụng BIM có thể giúp giảm 40% các thay đổi không mong muốn trong quá trình thi công, sai số dự toán chỉ còn dưới 3%, và tiết kiệm 10% tổng thời gian dự án.

Tại Việt Nam, hiện nay, Chính phủ đã có lộ trình bắt buộc áp dụng BIM. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất là tính Interoperability (khả năng tương tác dữ liệu) giữa chủ đầu tư, nhà thầu và cơ quan quản lý nhà nước. Chúng ta cần một hệ tiêu chuẩn số thống nhất.

Trong tiến trình xây dựng, Hà Nội và TP.HCM đang ngạt thở vì ùn tắc và ô nhiễm không khí. Ngành Xây dựng đóng vai trò gì trong việc tái cấu trúc không gian đô thị, thưa ông?

- Xây dựng không chỉ là từng tòa nhà đơn lẻ, mà là hệ sinh thái đô thị. Việc tích hợp BIM với GIS (Hệ thống thông tin địa lý) sẽ tạo ra các đô thị thông minh. Ví dụ, tại TP.HCM, nếu có hệ thống dữ liệu số về hạ tầng kỹ thuật ngầm (điện, nước, viễn thông), chúng ta sẽ không còn cảnh "hôm nay rải nhựa, mai đào lên làm cống". Đây chính là cách giảm ICOR hiệu quả nhất.

Khi xây dựng một cây cầu hay một tòa nhà, chúng ta đồng thời tạo ra một bản sao kỹ thuật số của nó. Bản sao này tích hợp các cảm biến IoT để theo dõi độ võng, vết nứt hay mức tiêu thụ năng lượng theo thời gian thực. Đây chính là nền tảng của Đô thị thông minh (Smart City). Việt Nam không thể xây dựng đô thị thông minh trên nền tảng hồ sơ giấy.

Xây dựng không chỉ là xây nhà, mà là tạo ra không gian sống. Việt Nam đang đối mặt với tình trạng đô thị hóa tự phát, dẫn đến ngập lụt tại các đô thị lớn như Hà Nội, TP.HCM và Cần Thơ.

Quy hoạch trong giai đoạn tới phải dựa trên nền tảng TOD (Transit Oriented Development) - phát triển đô thị lấy định hướng giao thông công cộng làm trung tâm. Các khu đô thị mới phải gắn liền với các ga Metro, các nút giao cao tốc để giảm áp lực giao thông cá nhân.

Do thiên tai chiếm tới 1 - 1,5% GDP mỗi năm, ngành Xây dựng phải tiên phong trong việc thiết lập các tiêu chuẩn xây dựng kháng chấn, chống bão và các giải pháp hạ tầng "đô thị xốp" (Sponge City) để giữ và thoát nước thông minh.

Chúng ta phải chuyển từ mô hình đô thị "vết dầu loang" sang mô hình đô thị nén theo định hướng giao thông công cộng (TOD).

Ông có nhắc đến mô hình TOD. Đây có phải là lời giải cho tình trạng ùn tắc và ngập úng tại các siêu đô thị như Hà Nội hay TP.HCM?

- Chắc chắn. TOD là mô hình phát triển đô thị lấy định hướng giao thông công cộng làm trung tâm.

Câu hỏi đặt ra là, tại sao các tuyến Metro của chúng ta hiện nay gặp khó khăn về tài chính? Vì chúng ta mới chỉ xây "đường ray" mà chưa khai thác "giá trị gia tăng từ đất" xung

TS Lê Quang Hùng sinh năm 1962, quê quán: Hạ Hòa, tỉnh Phú Thọ; tốt nghiệp đại học và học vị tiến sĩ tại Tiệp Khắc cũ, chuyên ngành kỹ thuật xây dựng.

Ông có nhiều năm công tác trong lĩnh vực nghiên cứu, quản lý chất lượng công trình và vật liệu xây dựng tại Bộ Xây dựng: Từ năm 1988 - 2003 công tác tại Viện Khoa học Công nghệ xây dựng; Từ 2003 - 2014 là Phó cục trưởng, Cục trưởng Cục Giám định Nhà nước về chất lượng công trình xây dựng. Từ tháng 8/2014 là Thứ trưởng Bộ Xây dựng. Cuối năm 2022 ông nghỉ hưu theo chế độ.

Trong thời gian giữ cương vị Thứ trưởng Bộ Xây dựng, ông phụ trách nhiều lĩnh vực quan trọng như quản lý chất lượng công trình xây dựng, hoạt động đầu tư xây dựng, giám định chất lượng, an toàn lao động ngành Xây dựng và phát triển khoa học công nghệ xây dựng.

Ngoài ra, ông cũng tham gia hoạt động đối ngoại và hội nghề nghiệp, từng là Chủ tịch Hội hữu nghị Việt Nam - Angeri, thành viên Hội đồng Tư vấn chính sách của Thủ tướng Chính phủ (2024-2026).

Hiện ông là Chủ tịch Hội Bê tông Việt Nam, Chủ tịch Hội Hữu nghị Việt Nam - Slovakia nhiệm kỳ 2023-2028.

quanh các nhà ga(?)! Trong khi đó, tại Tokyo hay Hong Kong, các tập đoàn đường sắt sống bằng bất động sản và dịch vụ tại nhà ga chứ không chỉ bằng vé tàu.

Với Việt Nam, nếu chúng ta quy hoạch các khu đô thị nén xung quanh nhà ga Metro trong bán kính 500 - 800 m, sẽ giúp giảm nhu cầu xe cá nhân, tăng hiệu quả sử dụng đất và tạo nguồn thu để tái đầu tư hạ tầng.

Bên cạnh đó, biến đổi khí hậu đang khiến nước biển dâng và các trận mưa cực đoan trở nên thường xuyên hơn. Ngành Xây dựng phải thay đổi tư duy từ "chống lại thiên nhiên" sang "thích ứng". Thay vì xây đê thật cao và cống thật lớn, chúng ta xây dựng các công viên ngầm, các bề mặt thấm nước, hồ điều hòa để giữ nước lại khi mưa lớn và tái sử dụng khi khô hạn. Chẳng hạn, Cần Thơ và các đô thị ven biển miền Trung đang là những địa bàn thử nghiệm quan trọng cho mô hình này.

Thưa ông, nếu dùng một từ để mô tả về ngành Xây dựng Việt Nam trong 5 - 10 năm tới, ông sẽ dùng từ gì?

- Tôi sẽ dùng từ "Bứt phá". Ngành Xây dựng không chỉ là những khối bê tông khô khốc. Đó là nghệ thuật tổ chức không gian sống, là xương sống của nền kinh tế và là biểu tượng cho sức mạnh quốc gia. Khi chúng ta xây dựng được những con đường cao tốc chạy dọc chiều dài đất nước, những sân bay hiện đại bậc nhất khu vực, những đô thị thông minh chống chịu được biến đổi khí hậu, đó là lúc chúng ta tạo ra nền tảng vững chắc nhất cho giấc mạn thịnh vượng năm 2045.

Tuy nhiên, con đường phía trước còn nhiều lực cản. Lực cản lớn nhất không phải là thiếu vốn, mà là định mức kinh tế kỹ thuật cũ kỹ và tư duy quản lý theo kiểu "xin - cho". Chúng ta cần một cuộc cách mạng về thể chế trong ngành Xây dựng để giải phóng mọi nguồn lực xã hội.

Sau cùng, ông có thông điệp gì gửi đến các doanh nghiệp và những người làm nghề xây dựng trong giai đoạn bước ngoặt này?

- Ngành Xây dựng Việt Nam đang đứng trước một "vận hội" lớn. Chúng ta có thị trường nội địa khổng lồ từ đầu tư công, có những doanh nghiệp tư nhân đầy khát vọng và một Chính phủ quyết liệt hành động.

Tuy nhiên, "đi trước mở đường" cũng đồng nghĩa với việc phải chấp nhận đối mặt với những khó khăn chưa có tiền lệ. Doanh nghiệp không thể mãi làm theo cách cũ mà kỳ vọng kết quả mới. Tôi kỳ vọng vào một thế hệ doanh nghiệp xây dựng Việt Nam:

Làm chủ công nghệ lõi: Không chỉ dừng lại ở thuê máy, thuê mướn công nghệ ngoại.

Quản trị minh bạch: Để giảm chỉ số ICOR, tăng niềm tin cho các nhà đầu tư.

Tư duy Xanh: Vì đó là tấm hộ chiếu để ngành Xây dựng Việt Nam bước ra thế giới.

Hạ tầng đi trước, kinh tế theo sau. Nếu chúng ta xây dựng được một hệ thống hạ tầng hiện đại, đồng bộ và thông minh, mục tiêu tăng trưởng 10% không phải là điều bất khả thi. Đó chính là nền tảng để Việt Nam vươn mình, trở thành một quốc gia thịnh vượng vào năm 2045.

Trân trọng cảm ơn ông về cuộc trò chuyện đầy tâm huyết và những góc nhìn chuyên sâu này!

Ám ảnh rác thải pin xe điện!

NGUYỄN HOÀNG LINH

Quốc hội đã biểu quyết thông qua việc kéo dài thời gian ưu đãi thuế với xe điện dưới 24 chỗ đến hết năm 2030, tuy nhiên, một điều lo lắng vẫn ám ảnh được thể hiện trên nghị trường, đó là rủi ro ô nhiễm môi trường từ pin xe điện khi hư hỏng hoặc hết hạn sử dụng.

TẠO NỀN TẢNG CHÍNH SÁCH ƯU ĐÃI BỀN VỮNG

Trong chiến lược chuyển đổi giao thông xanh, việc tiếp tục phát triển xe ôtô điện có gắn động cơ chạy bằng pin được xác định là một trong những giải pháp quan trọng nhằm giảm phát thải khí nhà kính, giảm ô nhiễm môi trường đô thị và từng bước thay thế phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch theo các mục tiêu, cam kết quốc tế của Việt Nam

Con số thống kê cho thấy, nhờ ưu đãi thuế tiêu thụ đặc biệt, từ ngày 01/3/2022 đến hết năm 2025, tổng lượng xe ôtô gắn động cơ dưới 24 chỗ chạy bằng pin nhập khẩu và sản xuất trong nước đã tăng từ 7.663 chiếc (năm 2022) lên 179.316 chiếc (năm 2025). Số thu ngân sách nhà nước đối với nhóm xe này tăng từ 213,38 tỷ đồng lên 2.371,97 tỷ đồng.

Với những kết quả khả quan như vậy, Quốc hội đã gia hạn ưu đãi thuế tiêu thụ đặc biệt đối với xe có gắn động cơ dưới 24 chỗ chạy bằng pin và cho rằng đây là giải pháp cần thiết và cấp thiết trong bối cảnh hiện nay.

Chẳng hạn, đối với xe ôtô chở người và xe chở người 4 bánh có gắn động cơ từ 9 chỗ trở xuống, xe ôtô pick-up (bán tải) chở người áp dụng thuế suất thuế tiêu thụ đặc biệt 3% đến hết ngày 31/12/2030, từ 01/01/2031 áp dụng mức thuế suất thuế tiêu thụ đặc biệt 11%. Hoặc như với xe ôtô chở người và xe chở người 4 bánh có gắn động cơ từ 10 đến dưới 16 chỗ áp dụng thuế suất thuế tiêu thụ đặc biệt 2% đến hết ngày 31/12/2030, từ 01/01/2031 áp dụng mức thuế suất thuế tiêu thụ đặc biệt 7%...

Tuy nhiên, trong các phiên thảo luận tại nghị trường, không ít đại biểu Quốc hội đã lo lắng.

Đại biểu Đoàn Hùng Vũ lưu ý rủi ro ô nhiễm môi trường từ pin xe điện khi hư hỏng hoặc hết hạn sử dụng. Theo ông, chính sách khuyến khích tiêu dùng cần đi kèm phát triển hạ tầng trạm sạc, hoàn thiện hạ tầng kỹ thuật và thúc đẩy chuyển giao công nghệ sản xuất pin thân thiện với môi trường. Ông đề nghị bổ sung quy định bắt buộc doanh nghiệp sản xuất, lắp ráp, nhập khẩu xe điện phải thu hồi, tái chế pin đã qua sử dụng, đồng thời xây dựng hệ thống thu gom, xử lý chuyên nghiệp. Cùng với đó, cần có cơ chế khuyến khích đầu tư nghiên cứu công nghệ tái chế, thay thế các loại pin công nghệ cũ bằng pin thế hệ mới an toàn hơn, tránh nguy cơ phát sinh dạng ô nhiễm mới trong quá trình xử lý.

Đại biểu Nguyễn Thị Việt Nga ủng hộ chính sách ưu đãi thuế giúp giảm phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và tạo sự ổn định cho thị trường nhưng cho rằng, chính sách chỉ phát huy hiệu quả khi được triển khai đồng bộ với hạ tầng trạm sạc, năng lực của lưới điện phân phối, giải pháp xử lý pin thải và nâng tỷ lệ nội địa hóa…

CẢNH GIÁC VỚI RÁC THẢI PIN XE ĐIỆN!

Từ thực tiễn, các chuyên gia đều chung một nhận định rằng, pin xe điện độc hại và khó tái chế.

Đa số pin ôtô, xe máy điện hiện nay được tạo thành từ lithium-ion, một vật liệu có tính dẫn điện cao nhưng cũng rất dễ cháy và cực kỳ độc hại, cùng với các chất khác như coban, niken... Các nghiên cứu y tế cho thấy, coban được coi là chất có thể gây ung thư, đặc biệt là khi hít phải bụi coban trong quá trình sản xuất. Nó gây ra các bệnh về hô hấp (viêm phổi, hen suyễn) và tim mạch. Niken là một trong những kim loại gây dị ứng phổ biến nhất, gây viêm da khi tiếp xúc. Hít phải bụi niken có thể dẫn đến ung thư phổi, viêm xoang và các vấn đề nghiêm trọng về hô hấp. Cơ thể người khi tiếp xúc với lithium hoặc nuốt phải nồng độ cao có thể gây ngộ độc cấp tính, ảnh hưởng nặng đến hệ thần kinh trung ương…

Khi những viên pin này được thải loại không đúng cách, những hóa chất độc hại này có thể thấm vào đất và nước, làm ô nhiễm tài nguyên thiên nhiên trong nhiều năm.

Ngoài những vấn đề nghiêm trọng về sức khỏe, chất thải từ pin còn thải ra một lượng lớn khí nhà kính. Theo đó, khoảng 20 - 30 nghìn tấn CO2 được thải ra trên mỗi gigawatt giờ công suất pin được tạo ra.

Theo một nghiên cứu của Cơ quan Năng lượng Quốc tế

(IEA), đến năm 2035, sẽ có hơn 11 triệu tấn pin lithium-ion bị loại bỏ, tăng gấp 10 lần so với số liệu hiện nay. Điều này cho thấy, các quốc gia cần tìm ra các phương pháp tái chế pin bền vững nhằm giảm thiểu tác động bất lợi của pin xe điện đến môi trường.

Thông thường trên thế giới hiện nay, có 3 giải pháp xử lý pin xe điện sau khi hết vòng đời sử dụng.

Thứ nhất, tái sử dụng để cung cấp nguồn điện cho các máy móc, thiết bị khác, bởi ngay cả khi hết hạn sử dụng, pin vẫn có thể lưu trữ đến 70% năng lượng.

Thứ hai, tái chế pin cũ để tạo ra pin mới.

Thứ ba, trực tiếp thải loại pin bằng hình thức chôn lấp.

Tuy nhiên, các giải pháp tái chế pin hiện nay có yêu cầu chi phí rất cao, chưa đem lại lợi nhuận thấy rõ cho doanh nghiệp. Một nghiên cứu cho thấy, hơn 90% pin hết hạn được tái chế bằng phương pháp đốt nung, gây lãng phí một lượng lớn nguyên liệu, trong đó có cả các nguyên liệu quý hiếm. Chỉ gần 10% pin được chiết xuất nguyên liệu riêng lẻ để tái sử dụng.

TẦM NHÌN XA 10 - 15 NĂM VÀ "3 VÒNG LUÂN HỒI"

Có thể nhiều người bất ngờ khi biết rằng, Chính phủ vừa mới cho phép tỷ lệ tái chế bắt buộc (EPR) với pin xe điện và hybrid giảm về 0% cho đến thời điểm lộ trình điều chỉnh tiếp theo dự kiến vào 2029. Đó là một phần nội dung trong Nghị định số 110/2026/NĐ-CP quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Bảo vệ môi trường về trách nhiệm tái chế sản phẩm, bao bì và trách nhiệm xử lý chất thải của nhà sản xuất, nhập khẩu.

Theo đó, ta có thể hiểu rằng các nhà sản xuất và nhập khẩu ô tô điện tại Việt Nam như VinFast, Toyota… tạm thời trong giai đoạn từ nay đến 2029 chưa phải thực hiện nghĩa vụ thu gom và tái chế pin điện.

Cũng có lý do của nó. Theo phân tích của các chuyên gia, xe điện đang sử dụng tại Việt Nam hiện còn mới, đa số mới lăn bánh vài năm, trong khi tuổi thọ pin trung bình cũng được nâng cao từ 8 - 12 năm lên 10 - 15 năm. Do đó, hiện Việt Nam chưa có lượng pin thải đủ lớn để vận hành các nhà máy tái chế một cách hiệu quả. Cùng với đó, pin xe điện khi xuống cấp ở mức 70 - 80% vẫn có thể được dùng làm hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) thêm hàng chục năm trước khi cần tái chế thực sự, nghĩa là có thể ưu tiên tái sử dụng. Chúng có thể cung cấp năng lượng cho những chiếc xe nhỏ hơn, hoặc thậm chí có thể dự trữ năng lượng cung cấp ánh sáng cho cả một thị trấn, không những không đe dọa tới môi trường như lo ngại của nhiều người mà ngược lại còn hỗ trợ rất lớn cho công cuộc chuyển đổi năng lượng xanh.

Tại Việt Nam, được biết hiện mới chỉ có VinES (nay đã sáp nhập vào VinFast) là doanh nghiệp sản xuất pin xe điện, đồng thời cũng là công ty chuyên tái chế pin xe điện dưới hình thức hợp tác đầu tư.

Ngay từ khi chuyển hướng sản xuất xe thuần điện, VinFast đã sớm chuẩn bị một lộ trình bài bản để xử lý pin xe điện, đảm bảo chúng không trở thành rác thải độc hại. Chiến lược của doanh nghiệp này tập trung vào 3 giai đoạn chính:

Dù Nhà nước chưa bắt buộc tỷ lệ tái chế nhưng với tầm nhìn 10 - 15 năm và xa hơn nữa, Vinfast vẫn chủ động xây dựng "3 vòng luân hồi" cho pin điện để vừa bảo vệ môi trường, vừa tối ưu hóa chi phí nguyên liệu đắt đỏ".

Giai đoạn đầu tiên là thu hồi và quản lý (vòng đời thứ nhất). VinFast cam kết bảo hành pin lên đến 8 - 10 năm. Trong giai đoạn khách hàng còn thuê pin, nếu dung lượng pin xuống dưới 70%, hãng sẽ chịu trách nhiệm đổi pin mới cho khách. Thông qua việc quản lý tập trung (thuê pin hoặc đổi pin xe máy điện tại trạm), VinFast có thể kiểm soát hoàn toàn lượng pin cũ, tránh việc người dân tự ý vứt bỏ ra môi trường.

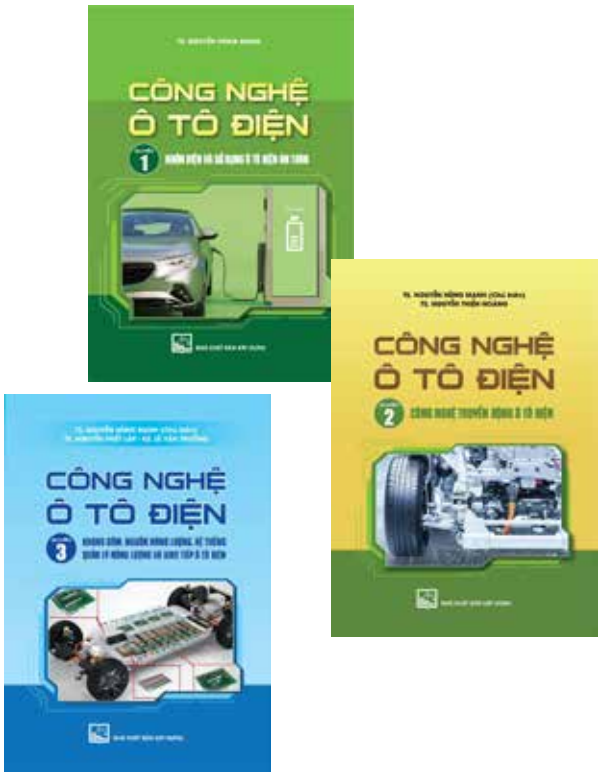
Giai đoạn thứ 2 là tái sử dụng (vòng đời thứ hai). Trước khi đem đi tái chế hóa học, pin cũ của VinFast sẽ được tận dụng lại. Hãng đã hợp tác với Marubeni (Nhật Bản), ký biên bản ghi nhớ để nghiên cứu sản xuất hệ thống lưu trữ năng lượng BESS từ pin xe điện cũ. Những viên pin không còn đủ hiệu năng chạy xe sẽ được lắp ghép thành các trạm tích trữ điện lưới, trạm sạc xe điện, hoặc nguồn điện dự phòng cho các nhà máy.

Ở giai đoạn 3 là tái chế hoàn toàn (vòng đời cuối), khi pin không còn khả năng lưu trữ điện hiệu quả cho các hệ thống BESS, VinFast sẽ tiến hành tái chế. Từ 03/11/2022, VinES đã hợp tác với Li-Cycle về tái chế pin lithium. Theo thỏa thuận, Li-Cycle sẽ cung cấp những giải pháp tái chế trên quy mô toàn cầu cho VinFast. Các công nghệ tái chế pin lithium-ion bền vững và được cấp bằng sáng chế của Li-Cycle, bao gồm công nghệ Spoke & Hub, là nhóm giải pháp phù hợp về cả quy mô lẫn mục tiêu đối với khả năng sản xuất và kế hoạch của VinFast.

Như vậy, dù Nhà nước chưa bắt buộc tỷ lệ tái chế nhưng với tầm nhìn 10 - 15 năm và xa hơn nữa, Vinfast vẫn chủ động xây dựng "3 vòng luân hồi" này để vừa bảo vệ môi trường, vừa tối ưu hóa chi phí nguyên liệu đắt đỏ.

BỘ SÁCH "CÔNG NGHỆ Ô TÔ ĐIỆN":

Hệ thống hóa kiến thức từ sử dụng an toàn đến công nghệ nền tảng



> AN NHIÊN

Bộ sách gồm 3 quyển, cung cấp hệ thống kiến thức từ nhận diện, sử dụng an toàn, công nghệ truyền động đến khung gầm, nguồn năng lượng, quản lý năng lượng và giao tiếp ô tô điện.

Biến đổi khí hậu đang là vấn đề cấp bách toàn cầu, đặt ra yêu cầu chuyển đổi mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực, trong đó có giao thông vận tải. Trong bối cảnh đó, chuyển đổi từ phương tiện sử dụng động cơ đốt trong sang phương tiện thân thiện hơn với môi trường, đặc biệt là ô tô điện, đang trở thành xu hướng tất yếu.

Ô tô điện gồm: ô tô thuần điện và ô tô điện lai, không chỉ là giải pháp giảm phát thải trong giao thông, mà còn là thành tố quan trọng của hệ thống giao thông thông minh. Nhiều quốc gia, trong đó có Việt Nam, đã và đang xây dựng chiến lược, chính sách thúc đẩy phát triển phương tiện giao thông điện hóa.

Cùng với xu hướng này, công nghệ ô tô điện phát triển nhanh, tập trung vào các nhóm công nghệ nền tảng như: nhận diện và sử dụng an toàn, công nghệ truyền động, khung gầm, nguồn năng lượng, hệ thống quản lý năng lượng, mạng giao tiếp và công nghệ hỗ trợ lái xe thông minh.

Bộ sách "Công nghệ tô điện" được biên soạn nhằm cung cấp hệ thống kiến thức cơ bản và chuyên sâu về loại hình phương tiện đang phát triển mạnh mẽ này. Bộ sách gồm 3 quyển, được xây dựng theo hướng từ nhận diện, sử dụng an toàn đến công nghệ truyền động và các hệ thống kỹ thuật nền tảng của ô tô điện hiện đại.

Quyển 1, nhận diện và sử dụng ô tô điện an toàn, tập trung vào những kiến thức cơ bản giúp người đọc nhận diện đặc điểm của ô tô điện, hiểu các yêu cầu an toàn trong quá trình sử dụng, vận hành và tiếp cận loại hình phương tiện mới. Đây là nội dung nền tảng, phù hợp với người dùng, sinh viên và các đối tượng bước đầu tìm hiểu về ô tô điện.

Quyển 2, công nghệ truyền động ô tô điện, đi sâu vào hệ thống truyền động, một trong những nội dung kỹ thuật cốt lõi của ô tô điện. Quyển sách giúp người đọc tiếp cận các vấn đề về cấu trúc, nguyên lý và công nghệ truyền lực, qua đó làm rõ sự khác biệt giữa phương tiện sử dụng động cơ đốt trong truyền thống và phương tiện điện hóa.

Quyển 3, khung gầm, nguồn năng lượng, hệ thống quản lý năng lượng và giao tiếp ô tô điện tiếp nối hai quyển trước, đồng thời hoàn thiện thêm hệ thống nội dung về công nghệ ô tô điện. Quyển sách tập trung vào các nhóm công nghệ nền tảng có vai trò quyết định đến hiệu suất, độ an toàn, khả năng vận hành và xu hướng phát triển của ô tô điện thông minh trong tương lai.

Nếu Quyển 1 giúp người đọc tiếp cận ô tô điện từ góc độ nhận diện và sử dụng an toàn, Quyển 2 tập trung vào công nghệ truyền động, thì Quyển 3 mở rộng sang các hệ thống kỹ thuật có tính nền tảng và liên kết cao hơn, gồm khung gầm, nguồn năng lượng, quản lý năng lượng và giao tiếp dữ liệu. 3 quyển sách tạo thành một chỉnh thể tương đối hoàn chỉnh, giúp người đọc tiếp cận công nghệ ô tô điện từ cơ bản đến chuyên sâu.

Trong bối cảnh công nghệ ô tô điện thay đổi nhanh, bộ sách "Công nghệ ô tô điện" là nỗ lực hệ thống hóa kiến thức chuyên ngành, góp phần cung cấp tài liệu học tập, nghiên cứu và tham khảo cho quá trình đào tạo, tiếp cận và ứng dụng công nghệ ô tô điện tại Việt Nam. 3 quyển sách phản ánh xu hướng chuyển đổi của ngành giao thông vận tải theo hướng điện hóa, thông minh và thân thiện hơn với môi trường.

Bộ sách được biên soạn bởi TS Nguyễn Hùng Mạnh (Chủ biên) cùng các cộng sự. NXB Xây dựng phát hành dưới dạng bản in và bản điện tử (ebook).❖

■Ngày nhận bài: 31/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Xác định vị trí điểm trung chuyển giao thông công cộng tại TP Hồ Chí Minh

Spatial identification of public transport interchange hubs in Ho Chi Minh City

> TRẦN THỊ VIỆT HÀ[1], VÕ TRỌNG NGHĨA[2, 3,*]
[1]Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]Trường Đại học Khoa học Xã hội và Nhân văn TP.HCM
[3]Đại học Quốc gia TP.HCM; [*]Email: votrongnghia@hcmussh.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này xác định các vị trí tiềm năng cho điểm trung chuyển giao thông công cộng tại TP.HCM thông qua tích hợp phương pháp đánh giá đa tiêu chí với phân tích không gian trong hệ thống GIS. Khung phân tích được xây dựng dựa trên ba nhóm yếu tố gồm nhu cầu di chuyển đô thị, khả năng kết nối mạng lưới giao thông và cấu trúc không gian đô thị. Kết quả cho thấy các vị trí có mức độ phù hợp cao tập trung chủ yếu dọc các hành lang giao thông chính và tại những nơi có mật độ hoạt động đô thị lớn. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định các vị trí tiềm năng cho hệ thống điểm trung chuyển quy mô lớn và nhỏ, góp phần hình thành cấu trúc trung chuyển đa cực trong không gian đô thị.

Từ khóa: Đánh giá đa tiêu chí; giao thông công cộng; hệ thống thông tin địa lý; điểm trung chuyển; quy hoạch giao thông đô thị.

ABSTRACT

This study identifies potential locations for public transport interchange hubs in Ho Chi Minh City by integrating Multi Criteria Evaluation with spatial analysis in a GIS environment. The analytical framework considers three groups of factors: urban travel demand, network connectivity, and urban spatial structure. The results indicate that highly suitable areas are mainly located along major transport corridors and in zones with high urban activity density. Based on the spatial suitability analysis, potential locations for both large scale and small scale interchange hubs are identified, suggesting the formation of a polycentric interchange structure within the urban space of the city.

Keywords: Geographic information systems; multi criteria evaluation; public transport; transport interchange; urban transport planning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các điểm trung chuyển giữ vai trò then chốt trong cấu trúc của hệ thống giao thông công cộng đô thị (GTCC). Trong mạng lưới vận tải đô thị, các nút trung chuyển cho phép hành khách chuyển đổi giữa các tuyến vận tải và góp phần tổ chức dòng di chuyển trong toàn bộ hệ thống GTCC. Nhiều nghiên cứu cho thấy hiệu quả của hệ thống GTCC không chỉ phụ thuộc vào mật độ tuyến hay quy mô mạng lưới mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi cấu trúc không gian của các nút kết nối trong mạng lưới giao thông (Cervero, 2004; Rodrigue et al., 2009; Vuchic, 2007). Từ góc độ quy hoạch đô thị, các khu vực có mật độ hoạt động cao và mức độ kết nối giao thông lớn thường có khả năng hình thành các nút trung chuyển quan trọng trong mạng lưới vận tải đô thị, đồng thời trở thành các không gian tập trung hoạt động trong cấu trúc phát triển đô thị (Bertolini, 1999; Cervero & Kockelman, 1997). Các nghiên cứu về cấu trúc mạng lưới giao thông cũng cho thấy những vị trí có mức độ kết nối cao thường đóng vai trò phân phối dòng di chuyển trong hệ thống giao thông đô thị (Marshall, 2005; Rodrigue et al., 2009).

Trong thực tiễn quy hoạch giao thông, việc xác định vị trí các điểm trung chuyển thường dựa trên phân tích mạng lưới giao thông, nhu cầu di chuyển và cấu trúc sử dụng đất. Những năm gần đây, các phương pháp phân tích không gian trong hệ thống thông tin địa lý kết hợp với đánh giá đa tiêu chí đã được sử dụng rộng rãi nhằm hỗ trợ lựa chọn vị trí hạ tầng giao thông trong quy hoạch đô thị, thông qua việc tích hợp nhiều lớp dữ liệu không gian liên quan đến mạng lưới giao thông và cấu trúc đô thị (Eastman, 2012; Malczewski, 2006). Tuy nhiên, việc áp dụng cách tiếp cận tích hợp này để xác định các vị trí trung chuyển GTCC trong quy mô toàn đô thị vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong bối cảnh các đô thị đang phát triển nhanh.

Tại (TP.HCM[a]), mạng lưới xe buýt hiện đóng vai trò quan trọng trong hệ thống GTCC nhưng cấu trúc trung chuyển trong mạng lưới vận tải công cộng vẫn chưa được tổ chức rõ ràng trong không gian đô thị. Nhiều tuyến vận tải công cộng hoạt động tương đối độc lập và thiếu các nút kết nối hiệu quả, làm hạn chế khả năng chuyển tuyến và ảnh hưởng đến hiệu quả khai thác của toàn bộ hệ thống. Từ bối cảnh đó, nghiên cứu này nhằm xác định các khu vực tiềm năng cho việc phát triển các điểm trung chuyển GTCC tại TP.HCM thông qua tích hợp phương pháp đánh giá đa tiêu chí với phân tích không gian trong hệ thống GIS. Kết quả nghiên cứu xây dựng bản đồ mức độ phù hợp không gian đối với việc bố trí các điểm trung chuyển, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc tổ chức hệ thống trung chuyển và hỗ trợ quá trình quy hoạch phát triển GTCC tại TP.HCM.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp đánh giá đa tiêu chí kết hợp phân tích không gian nhằm xác định các khu vực phù hợp để bố trí điểm trung chuyển GTCC trong cấu trúc đô thị TP.HCM. Phương pháp đánh giá đa tiêu chí (MCE[b]) cho phép tích hợp nhiều tiêu chí không gian thông qua chuẩn hóa dữ liệu và gán trọng số, từ đó xác định mức độ phù hợp của từng khu vực trong không gian đô thị (Malczewski, 2006). Khi tích hợp trong GIS, phương pháp này hỗ trợ phân tích chồng lớp các dữ liệu không gian nhằm lựa chọn vị trí hạ tầng giao thông trong quy hoạch đô thị (Malczewski & Rinner, 2015). Quy trình nghiên cứu gồm ba bước: xây dựng hệ thống tiêu chí, chuẩn hóa dữ liệu không gian và phân tích chồng lớp đa tiêu chí để xây dựng bản đồ mức độ phù hợp.

Các tiêu chí phân tích được xây dựng dựa trên các nghiên cứu về cấu trúc mạng lưới vận tải đô thị và vai trò của các nút trung chuyển trong hệ thống GTCC. Trong quy hoạch giao thông, vị trí các điểm trung chuyển thường chịu ảnh hưởng của ba nhóm yếu tố chính: nhu cầu di chuyển đô thị, khả năng kết nối của mạng lưới giao thông và cấu trúc không gian đô thị (Cervero & Kockelman, 1997; Rodrigue et al., 2009; Vuchic, 2007). Tương ứng, nghiên cứu xem xét các tiêu chí phản ánh mật độ nhu cầu di chuyển, cường độ giao thông, khả năng tiếp cận các trục giao thông chính, mật độ nút giao, mật độ trạm GTCC và cường độ phát triển đô thị. Các yếu tố này có quan hệ chặt chẽ với cấu trúc di chuyển và sự hình thành các nút trung chuyển trong mạng lưới vận tải công cộng (Bertolini, 1999; Cervero, 2004; Geurs & Van Wee, 2004).

Các lớp dữ liệu không gian tương ứng với từng tiêu chí được chuẩn hóa và tích hợp trong môi trường hệ thống thông tin địa lý (GIS). Trong nghiên cứu quy hoạch hạ tầng đô thị, phương pháp đánh giá đa tiêu chí thường được sử dụng để tích hợp nhiều lớp dữ liệu không gian nhằm hỗ trợ lựa chọn vị trí hạ tầng (Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015). Phương pháp này cho phép chuẩn hóa các tiêu chí theo cùng thang giá trị và tích hợp chúng thông qua phép tổng hợp trọng số trong quá trình phân tích không gian (Saaty, 2008).

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i$$

Trong đó S là mức độ phù hợp tổng hợp, w_i là trọng số của tiêu chí i, x_i là giá trị chuẩn hóa của tiêu chí và n là số tiêu chí phân tích (Malczewski, 2006). Kết quả của quá trình phân tích là bản đồ thể hiện mức độ phù hợp không gian, cho phép xác định các khu vực có tiềm năng cao đối với việc phát triển các điểm trung chuyển GTCC trong cấu trúc giao thông đô thị.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

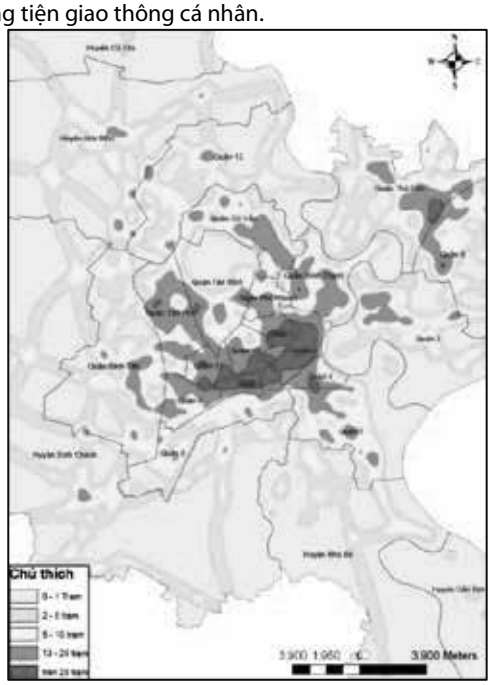
3.1. Phân tích phân bố mạng lưới GTCC

Phân tích dữ liệu không gian cho thấy mạng lưới GTCC tại TP.HCM có sự phân bố không đồng đều rõ rệt trong cấu trúc đô thị. Bản đồ mật độ trạm GTCC (Hình 1) thể hiện sự tập trung cao tại khu vực nội đô lịch sử, trong khi mật độ trạm giảm dần về phía các khu vực ngoại thành. Sự phân bố này phản ánh mối quan hệ chặt chẽ giữa mạng lưới vận tải công cộng với cấu trúc phát triển đô thị, trong đó các khu vực có mật độ sử dụng đất và cường độ hoạt động đô thị cao thường đồng thời là nơi tập trung nhiều tuyến vận tải và điểm dừng GTCC.

Các quận trung tâm gồm Quận 1, Quận 3, Quận 5, Quận 10 và Bình Thạnh thể hiện mật độ trạm GTCC cao nhất trong toàn bộ khu vực nghiên cứu. Đây là các khu vực có mật độ dân cư lớn và là nơi giao cắt của nhiều trục giao thông quan trọng trong mạng lưới giao thông đô thị. Sự hội tụ của các tuyến vận tải tại các khu vực này cho thấy vai trò trung tâm của nội đô trong cấu trúc tổ chức mạng lưới GTCC, nơi các dòng di chuyển đô thị có xu hướng tập trung và kết nối.

Ngược lại, các huyện ngoại thành như Củ Chi, Cần Giờ và Nhà Bè có mật độ trạm GTCC thấp hơn đáng kể, với khoảng cách lớn giữa các điểm dừng. Điều này cho thấy khả năng tiếp cận của hệ thống vận tải công cộng còn hạn chế tại các khu vực ngoại thành, đồng thời phản ánh sự phụ thuộc tương đối cao vào phương tiện giao thông cá nhân trong các hành trình di chuyển.

Phân tích dữ liệu không gian cho thấy mạng lưới GTCC tại TP.HCM phân bố không đồng đều trong cấu trúc đô thị. Bản đồ mật độ trạm GTCC (Hình 1) cho thấy sự tập trung cao tại khu vực nội đô lịch sử, đặc biệt tại các quận trung tâm gồm Quận 1, Quận 3, Quận 5, Quận 10 và Bình Thạnh, nơi hội tụ nhiều trục giao thông chính và có cường độ hoạt động đô thị lớn. Điều này phản ánh vai trò trung tâm của khu vực nội đô trong việc tổ chức và kết nối các dòng di chuyển trong mạng lưới GTCC. Ngược lại, các huyện ngoại thành như Củ Chi, Cần Giờ và Nhà Bè có mật độ trạm thấp hơn rõ rệt và khoảng cách giữa các điểm dừng lớn, cho thấy khả năng tiếp cận hệ thống vận tải công cộng còn hạn chế và mức độ phụ thuộc cao hơn vào phương tiện giao thông cá nhân.



Hình 1. Mật độ trạm GTCC tại TP.HCM *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

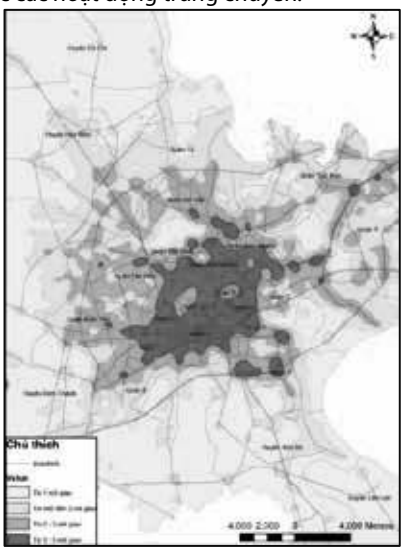
Từ góc độ cấu trúc mạng lưới, kết quả phân tích cho thấy hệ thống GTCC của thành phố hiện nay vẫn mang đặc trưng hướng tâm rõ rệt, trong đó phần lớn các tuyến vận tải tập trung kết nối tại khu vực trung tâm đô thị. Cấu trúc này làm gia tăng sự tập trung của dòng di chuyển tại nội đô và tạo ra nhu cầu tổ chức các điểm trung chuyển nhằm tăng cường khả năng liên kết giữa các tuyến vận tải, đồng thời mở rộng phạm vi phục vụ của hệ thống GTCC trong không gian đô thị.

3.2. Phân tích cấu trúc mạng lưới giao thông đô thị

Để đánh giá khả năng hình thành các điểm trung chuyển trong cấu trúc giao thông đô thị, nghiên cứu tiến hành phân tích hai yếu tố quan trọng của mạng lưới giao thông gồm mật độ trục giao thông chính và mật độ các nút giao thông lớn. Hai yếu tố này phản ánh mức độ kết nối của mạng lưới và có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng tổ chức các điểm trung chuyển trong hệ thống vận tải công cộng.

Hình 2. Mật độ trục chính giao thông đô thị *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Bên cạnh cấu trúc của các trục giao thông, phân tích mật độ các nút giao thông lớn (Hình 3) cho thấy các khu vực có mật độ nút giao cao chủ yếu phân bố tại khu vực trung tâm thành phố và dọc theo các hành lang giao thông chính. Các nút giao này thường là nơi giao cắt của nhiều tuyến giao thông quan trọng, đóng vai trò là các điểm kết nối trong mạng lưới giao thông đô thị và tạo điều kiện thuận lợi cho việc tổ chức các hoạt động trung chuyển.



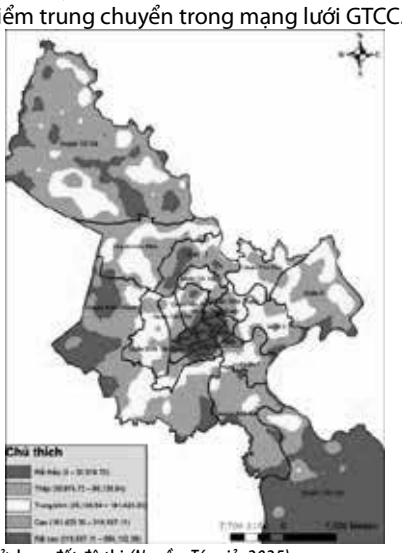
Hình 3. Mật độ nút giao thông lớn *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Sự hội tụ của mật độ trục giao thông cao và mật độ nút giao lớn tại các khu vực trung tâm và các hành lang phát triển đô thị cho thấy đây là những khu vực có mức độ kết nối cao trong cấu trúc mạng lưới giao thông của thành phố. Từ góc độ tổ chức vận tải đô thị, các khu vực có mức độ kết nối cao thường có khả năng hình thành các điểm trung chuyển quan trọng trong mạng lưới GTCC, bởi đây là nơi các tuyến vận tải có thể giao cắt và kết nối với nhau trong quá trình tổ chức dòng di chuyển đô thị.

3.3. Phân tích cấu trúc sử dụng đất đô thị

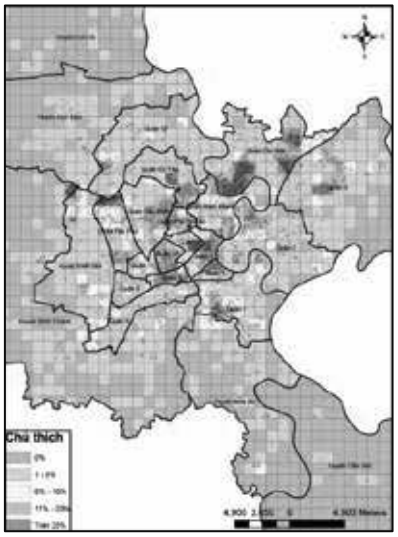
Cấu trúc sử dụng đất đô thị có ảnh hưởng trực tiếp đến sự phân bố nhu cầu di chuyển trong không gian đô thị. Các khu vực có mật độ sử dụng đất cao thường gắn với mật độ dân cư lớn và cường độ hoạt động kinh tế cao, từ đó tạo ra nhu cầu di chuyển lớn và khả năng phát sinh lưu lượng hành khách cao đối với hệ thống GTCC. Phân tích dữ liệu không gian về mật độ sử dụng đất tại TP.HCM cho thấy các khu vực có mức độ tập trung cao chủ yếu nằm trong khu vực nội đô lịch sử và các quận trung tâm của thành phố.

Kết quả phân tích mật độ sử dụng đất (Hình 4) cho thấy các khu vực có mật độ cao tập trung tại Quận 1, Quận 3, Quận 5 và Quận 10, nơi tập trung nhiều hoạt động thương mại, dịch vụ và các chức năng đô thị quan trọng. Đây là các khu vực có cường độ sử dụng đất lớn và đóng vai trò là các trung tâm hoạt động trong cấu trúc đô thị của thành phố. Mật độ hoạt động đô thị cao tại các khu vực này thường gắn với nhu cầu di chuyển lớn, do đó tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát triển các điểm trung chuyển trong mạng lưới GTCC.



Hình 4. Mật độ sử dụng đất đô thị *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Phân tích mật độ xây dựng đô thị (Hình 5) tiếp tục cho thấy sự tập trung của các khu vực có cường độ phát triển cao tại khu vực nội thành và dọc theo các hành lang phát triển đô thị. Các khu vực này thường có sự kết hợp của mật độ dân cư lớn, cường độ hoạt động kinh tế cao và khả năng tiếp cận thuận lợi với mạng lưới giao thông đô thị. Sự hội tụ của các yếu tố này tạo ra điều kiện thuận lợi cho việc hình thành các nút giao thông quan trọng trong mạng lưới vận tải đô thị.



Hình 5. Mật độ xây dựng đô thị trên 1 km^2 *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Từ góc độ tổ chức giao thông đô thị, các khu vực có mật độ sử dụng đất và mật độ xây dựng cao thường có khả năng phát sinh lượng hành khách lớn đối với hệ thống GTCC. Do đó, các khu vực này được xem là những vị trí tiềm năng để bố trí các điểm trung chuyển trong mạng lưới vận tải công cộng, nhằm tăng cường khả

năng tiếp cận của hành khách và nâng cao hiệu quả vận hành của hệ thống GTCC trong không gian đô thị.

3.4. Phân tích mức độ phù hợp của mạng lưới giao thông

Trên cơ sở tích hợp các lớp dữ liệu không gian liên quan đến nhu cầu di chuyển đô thị, cấu trúc mạng lưới giao thông và sử dụng đất, nghiên cứu tiến hành phân tích mức độ phù hợp của các khu vực trong không gian đô thị đối với việc phát triển các điểm trung chuyển GTCC. Kết quả phân tích đa tiêu chí trong môi trường GIS cho phép xác định bản đồ mức độ phù hợp không gian đối với việc bố trí các điểm trung chuyển GTCC tại TP.HCM.

Bản đồ mức độ phù hợp (Hình 6) cho thấy các khu vực có mức độ phù hợp cao và rất cao tập trung chủ yếu tại khu vực trung tâm và dọc theo các hành lang giao thông chính. Các khu vực này thể hiện sự hội tụ của nhiều yếu tố thuận lợi, bao gồm mật độ trục giao thông cao, mật độ nút giao lớn, mật độ sử dụng đất cao và khả năng tiếp cận tốt với mạng lưới GTCC hiện hữu. Sự kết hợp của các yếu tố này phản ánh mức độ kết nối cao trong cấu trúc mạng lưới giao thông đô thị, đồng thời cho thấy tiềm năng lớn của các khu vực này trong việc hình thành các nút trung chuyển của hệ thống vận tải công cộng.

Hình 6. Mức độ phù hợp của mạng lưới giao thông *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Ngược lại, các khu vực ngoại thành thể hiện mức độ phù hợp thấp hơn do mật độ mạng lưới giao thông và cường độ phát triển đô thị còn hạn chế. Tại các khu vực này, khoảng cách giữa các trục giao thông chính và các trạm GTCC tương đối lớn, dẫn đến khả năng kết nối mạng lưới GTCC thấp hơn so với khu vực nội thành.

Kết quả phân tích không gian cho thấy các khu vực có mức độ phù hợp cao thường nằm tại các điểm giao cắt của các hành lang giao thông quan trọng hoặc tại các khu vực có mật độ hoạt động đô thị lớn. Điều này cho thấy các khu vực có mức độ kết nối cao trong cấu trúc mạng lưới giao thông đô thị thường đồng thời là những vị trí có tiềm năng hình thành các điểm trung chuyển trong hệ thống vận tải công cộng. Kết quả phân tích này tạo cơ sở khoa học cho việc xác định các vị trí cụ thể của các điểm trung chuyển trong không gian đô thị, được trình bày chi tiết trong mục tiếp theo.

3.5. Xác định các khu vực tiềm năng phát triển điểm trung chuyển

Kết quả tổng hợp từ phân tích mức độ phù hợp không gian cho phép xác định các khu vực có tiềm năng cao đối với việc phát triển hệ thống điểm trung chuyển GTCC tại TP.HCM. Các vị trí này chủ yếu phân bố tại các khu vực có mức độ kết nối giao thông cao, đặc biệt là các nút giao quan trọng trong mạng lưới giao thông đô thị và các hành lang phát triển đô thị của thành phố. Sự hội tụ của các yếu tố gồm mật độ trục giao thông lớn, mật độ nút giao cao, mật độ sử dụng đất lớn và khả năng tiếp cận thuận lợi với mạng lưới GTCC hiện hữu tạo ra điều kiện thuận lợi cho việc hình thành các điểm trung chuyển trong cấu trúc mạng lưới vận tải công cộng.

Trên cơ sở phân tích không gian, nghiên cứu đề xuất hai nhóm điểm trung chuyển với vai trò và quy mô khác nhau trong hệ thống vận tải đô thị. Nhóm thứ nhất gồm các điểm trung chuyển quy mô lớn, được bố trí tại các nút giao thông quan trọng trong mạng lưới giao thông đô thị. Đây là các vị trí có khả năng kết nối nhiều tuyến vận tải khác nhau và đóng vai trò là các trung tâm phân phối hành khách trong mạng lưới GTCC của thành phố.

Hình 7. Bản đồ 15 vị trí điểm trung chuyển quy mô lớn *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Nhóm thứ hai gồm các điểm trung chuyển quy mô nhỏ, được bố trí tại các khu vực có mật độ dân cư và mật độ hoạt động đô thị cao, đồng thời có khả năng tiếp cận thuận lợi với mạng lưới GTCC. Các điểm trung chuyển này đóng vai trò hỗ trợ trong việc kết nối các khu vực dân cư với các tuyến vận tải chính, góp phần tăng cường khả năng tiếp cận của hệ thống GTCC đối với các khu vực khác nhau trong không gian đô thị.

Hình 8. Bản đồ 15 vị trí xây dựng điểm trung chuyển quy mô nhỏ/khu vực *(Nguồn: Tác giả, 2025)*

Phân bố không gian của các điểm trung chuyển được đề xuất cho thấy xu hướng hình thành cấu trúc trung chuyển đa cực trong không gian đô thị của TP.HCM. Bên cạnh các điểm trung chuyển nằm trong khu vực nội đô, nhiều vị trí tiềm năng được xác định dọc theo các hành lang giao thông chính và tại các khu vực cửa ngõ của thành

phố. Cấu trúc này cho phép tăng cường khả năng kết nối giữa các khu vực đô thị khác nhau, đồng thời góp phần phân tán dòng di chuyển trong mạng lưới giao thông đô thị.

Từ góc độ tổ chức vận tải đô thị, việc hình thành mạng lưới trung chuyển đa cực có thể góp phần tăng cường tính liên kết của hệ thống GTCC, giảm áp lực giao thông tại khu vực trung tâm và mở rộng phạm vi phục vụ của GTCC đối với các khu vực ngoại thành. Kết quả này cho thấy phương pháp tích hợp đánh giá đa tiêu chí và phân tích không gian trong GIS có thể cung cấp một công cụ hữu hiệu nhằm hỗ trợ xác định vị trí các điểm trung chuyển trong quy hoạch giao thông đô thị.

4. THẢO LUẬN

Kết quả phân tích không gian cho thấy các khu vực có mức độ phù hợp cao đối với việc phát triển các điểm trung chuyển GTCC chủ yếu tập trung dọc theo các hành lang giao thông chính và các khu vực có cường độ hoạt động đô thị lớn. Sự hội tụ của mật độ trục giao thông, mật độ nút giao và cường độ sử dụng đất cao cho thấy các điểm trung chuyển có xu hướng hình thành tại các vị trí có mức độ kết nối cao trong cấu trúc mạng lưới đô thị. Nhận định này phù hợp với các nghiên cứu về cấu trúc mạng lưới giao thông, trong đó các nút có khả năng kết nối cao thường đóng vai trò trung tâm trong việc tổ chức và phân phối dòng di chuyển trong hệ thống vận tải đô thị (Rodrigue et al., 2009; Vuchic, 2007).

Phân bố không gian của các vị trí trung chuyển tiềm năng đồng thời phản ánh mối quan hệ giữa cấu trúc phát triển đô thị và mạng lưới giao thông công cộng. Các khu vực có mức độ phù hợp cao thường nằm dọc theo các hành lang phát triển quan trọng của thành phố như Xa lộ Hà Nội, Quốc lộ 13 và trục Nguyễn Văn Linh. Điều này cho thấy các hành lang phát triển đô thị không chỉ định hướng mở rộng không gian đô thị mà còn đóng vai trò là các trục tổ chức của mạng lưới GTCC. Kết quả này tương đồng với các nghiên cứu về mối quan hệ giữa sử dụng đất và giao thông đô thị, trong đó các khu vực có mật độ hoạt động cao thường có khả năng hình thành các nút trung chuyển quan trọng trong mạng lưới vận tải công cộng (Bertolini, 1999; Cervero & Kockelman, 1997). Đồng thời, kết quả cũng cho thấy xu hướng hình thành cấu trúc trung chuyển đa cực trong không gian đô thị TP.HCM, với nhiều vị trí tiềm năng phân bố tại các hành lang giao thông và các khu vực cửa ngõ, qua đó góp phần phân tán dòng di chuyển và mở rộng phạm vi tiếp cận của hệ thống GTCC.

Từ góc độ phương pháp luận, việc tích hợp phương pháp đánh giá đa tiêu chí với phân tích không gian trong hệ thống GIS cho thấy hiệu quả trong việc xác định vị trí hạ tầng giao thông trong quy hoạch đô thị thông qua việc tích hợp các lớp dữ liệu về mạng lưới giao thông, sử dụng đất và cấu trúc đô thị. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại chủ yếu dựa trên các chỉ số cấu trúc không gian và chưa tích hợp dữ liệu động về dòng di chuyển hành khách. Việc kết hợp các dữ liệu về hành vi di chuyển, lưu lượng giao thông hoặc dữ liệu vận hành của hệ thống GTCC có thể giúp nâng cao độ chính xác của mô hình phân tích trong các nghiên cứu tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng khung phân tích không gian nhằm xác định vị trí các điểm trung chuyển GTCC tại TP.HCM thông qua tích hợp phương pháp đánh giá đa tiêu chí với phân tích không gian trong hệ thống GIS. Kết quả cho thấy các khu vực có mức độ phù hợp cao tập trung chủ yếu tại khu vực trung tâm đô thị và dọc theo các hành lang giao thông chính, nơi hội tụ các điều kiện thuận lợi về nhu cầu di chuyển, khả năng kết nối mạng lưới và cường độ phát triển đô thị. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định các vị trí tiềm năng cho hệ thống điểm trung chuyển quy mô lớn và quy mô nhỏ, đồng thời chỉ ra xu hướng hình thành cấu trúc trung chuyển đa cực trong không gian đô thị. Cách tiếp cận tích hợp MCE và GIS cung cấp một công cụ phân tích định lượng nhằm hỗ trợ lựa chọn vị trí hạ tầng giao thông và góp phần nâng cao cơ sở khoa học cho việc tổ chức hệ thống trung chuyển trong quy hoạch giao thông đô thị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bertolini, L. Spatial Development Patterns and Public Transport: The Application of an Analytical Model in the Netherlands. Planning Practice and Research, 14(2), 199-210, 1999, doi:10.1080/02697459915724.

[2] Cervero, R. Transit-Oriented Development in the United States: Experiences, Challenges, and Prospects. Transportation Research Board, 2004.

[3] Cervero, R., Kockelman, K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2(3), 199–219, 1997, doi:10.1016/S1361-9209(97)00009-6.

[4] Eastman, J. R. IDRISI Selva: Guide to GIS and Image Processing. Clark Laboratories, Clark University, Worcester, Massachusetts, USA, 2012.

[5] Geurs, K. T., Van Wee, B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. Journal of Transport Geography, 12(2), 127-140, 2004, doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005.

[6] Malczewski, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, 20(7), 703-726, 2006, doi:10.1080/13658810600661508.

[7] Malczewski, J., Rinner, C. Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. Springer Berlin Heidelberg, 2015, doi:10.1007/978-3-540-74757-4.

[8] Marshall, S. Streets & Patterns. Spon Press, 2005.

[9] Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B. The Geography of Transport Systems. 2nd ed., Routledge, 2009.

[10] Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1(1), 83-98, 2008, doi:10.1504/IJSSCI.2008.017590.

[11] Vuchic, V. R. Urban Transit Systems and Technology. John Wiley & Sons, 2007.

[a]Trước thời điểm sáp nhập (01/07/2025), các đơn vị hành chính cấp quận, huyện cũng được xác định theo địa danh tương ứng.

[b]Multi Criteria Evaluation

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Mô hình Quy hoạch không gian xung quanh các ga đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam: Lý luận trên thế giới và định hướng cho Việt Nam

Planning models for North-South High-speed railway station areas: Global theoretical frameworks and Strategic orientations for Vietnam

> THS.NCS DƯƠNG QUỲNH NGA*, PGS.TS LÊ QUỲNH CHI
Nhóm chuyên môn Quy hoạch, Khoa Kiến trúc và Quy hoạch, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: ngadq@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) là loại hình giao thông công cộng có ý nghĩa quan trọng trong phát triển quốc gia, vùng và đô thị dọc tuyến. Các ga ĐSTĐC là động lực thúc đẩy quá trình đô thị hóa nhưng đồng thời tiềm ẩn nhiều nguy cơ phát triển chủ quan không gắn với các hoạt động kinh tế và dân cư. Tuyến ĐSTĐC Bắc - Nam với 23 ga hành khách xây mới, được xác định chủ trương đầu tư trong Nghị quyết 172/2024/QH15 của Quốc hội, là dự án giao thông trọng điểm quốc gia đặc biệt ưu tiên, tác động lớn đến các khu vực đô thị gắn với ga. Bài báo tổng quan lý luận và xu hướng trên thế giới, từ đó định hướng phát triển không gian quanh các ga tại Việt Nam, kết hợp với phân tích vị trí, mối quan hệ giữa ga đường sắt tốc độ cao với các yếu tố hiện trạng và định hướng quy hoạch liên quan. Bài báo đề xuất tầm quan trọng trong phân loại tiềm năng và xác định đặc thù phát triển của từng ga, là cơ sở để thiết lập mô hình quy hoạch thích hợp, nhằm tối ưu hóa giá trị kinh tế đất đai và phát huy tối đa nguồn lực từ dự án hạ tầng trọng điểm này.

Từ khóa: Đường sắt tốc độ cao; giao thông công cộng; TOD; mô hình quy hoạch.

ABSTRACT

High-speed railway (HSR) is a crucial mode of public transportation that plays a pivotal role in national, regional, and corridor-based urban development. While HSR stations serve as catalysts for growth and accelerate urbanization, they also carry inherent risks of disjointed development if not properly integrated with local economic and demographic activities. The North-South High-Speed Railway, featuring 23 newly constructed passenger stations and officially approved for investment under Resolution No. 172/2024/QH15, is a specially prioritized national key transport project expected to profoundly impact station-adjacent urban areas. The paper provides a comprehensive review of global theoretical frameworks and development trends, coupled with an analysis of station locations and the interplay between HSR nodes, existing conditions, and relevant spatial planning orientations. Furthermore, the study emphasizes the critical need to classify the development potential and identify the unique characteristics of each station. This classification serves as the foundation for establishing appropriate planning models, thereby optimizing land economic values and maximizing the capitalization of resources from this pivotal infrastructure project.

Keywords: High-Speed Railway (HSR); Public transportation; Transit-Oriented Development (TOD); Planning models.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

ĐSTĐC là loại hình vận tải đường sắt có tốc độ thiết kế vượt trội so với đường sắt thông thường, Liên đoàn đường sắt quốc tế (UIC) quy định ĐSTĐC có tốc độ khai thác thương mại trên 250 km/h với tuyến xây mới và trên 200km/h với tuyến cải tạo; Liên minh châu Âu (EU) thì quy định tốc độ trên 250 km/h và có thể đạt tới 300 km/h với các tuyến mới (Qizhou Hu, 2023); Tại Việt Nam, Luật Đường sắt cũng xác định ngưỡng vận tốc cho loại hình này là trên 200 km/h (Luật Đường sắt, 2025).

Trên thế giới, ĐSTĐC chính thức ra đời ngày 01/10/1964, với tuyến Tokaido Shinkansen dài 515 km, tốc độ vận hành ban đầu 210 km/h đáp ứng nhu cầu vận tải gia tăng cùng tốc độ phát triển kinh tế nhanh chóng của Nhật Bản, sau này trở thành xương sống của vận tải hành khách quốc gia. Mô hình ĐSTĐC nhanh chóng lan rộng trên thế giới, Trung Quốc đã vươn lên là quốc gia có tuyến ĐSTĐC dài nhất thế giới với hơn 20.000 km đường sắt và 1.200 đoàn tàu mới. (Leboeuf, 2018)

ĐSTĐC có nhiều ưu thế để trở thành lựa chọn chiến lược trong phát triển giao thông vận tải của các quốc gia: (1) tốc độ vận hành

cao, thời gian di chuyển nhanh (Ennio Cascetta et al, 2011); (2) năng lực vận chuyển lớn; (3) tính an toàn, chất lượng và độ chính xác cao; (4) khả năng vận hành liên tục trong thời tiết khắc nghiệt. Ngoài ra, hệ thống này còn có các ưu điểm như tiêu thụ năng lượng thấp, sử dụng đất tiết kiệm, mức độ ô nhiễm thấp và đem lại sự thoải mái cao cho hành khách. (Qizhou Hu, 2023)

ĐSTĐC tại châu Âu phát triển trên nền tảng cấu trúc đô thị đã ổn định, chủ yếu sử dụng các ga trung tâm hiện hữu được cải tạo, đóng vai trò như lớp hạ tầng bổ sung để tái thiết đô thị và kết nối vùng. Tuy nhiên, tại các đô thị nhỏ hoặc ga ngoại ô, khả năng phát triển đô thị thường hạn chế, chủ yếu chỉ hình thành các chức năng phục vụ giao thông (Vickerman, 2014). Dù vậy, khu vực quanh ga đang dần chuyển đổi từ không gian giao thông đơn thuần sang các "trung tâm hỗn hợp" đa năng (văn phòng, bán lẻ, văn hóa) (Juan Bautista Font Torres, 2025). Tại châu Á, ĐSTĐC được xem là động lực cốt lõi để hình thành không gian đô thị mới và tái cấu trúc mạng lưới đô thị (SUN, 2015). Nhiều đô thị mới đã hình thành xung quanh các nhà ga nằm ngoài lõi trung tâm nhờ sự đầu tư đồng bộ về hạ tầng (Biyue Wang, 2022). Tuy nhiên, thực tiễn cũng cảnh báo rủi ro về các "đô thị ma" nơi thiếu vắng các hoạt động kinh tế - xã hội thực chất và dân cư sinh sống (Lei Dong, 2021).

Triển khai Quy hoạch tổng thể quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, Nghị quyết 172/2024/QH15 đã quyết định đầu tư Dự án ĐSTĐC Bắc-Nam dài 1.541 km, tốc độ thiết kế 350 km/h với 23 ga hành khách, 5 ga hàng hóa. Tuyến ĐSTĐC chạy dọc hành lang kinh tế Bắc - Nam, là trục không gian chiến lược kết nối hai trung tâm kinh tế - chính trị lớn nhất cả nước, được kỳ vọng sẽ góp phần điều tiết lại phân bố dân cư đang tập trung quá mức vào hai cực đô thị ở hai đầu đất nước, đồng thời tạo động lực phát triển đô thị theo định hướng gắn với giao thông công cộng (TOD) dọc tuyến. (Liên danh tư vấn Tedi, 2024).

2. TỔNG QUAN LÝ LUẬN VÀ XU HƯỚNG VỀ ĐSTĐC VÀ PHÁT TRIỂN ĐÔ THỊ

2.1. ĐSTĐC và tác động đến phát triển đô thị

Tác động của ĐSTĐC đến phát triển đô thị khác biệt rõ rệt theo ba không gian: vùng, đô thị và khu vực phụ cận nhà ga.

Ở cấp độ vùng, ĐSTĐC làm thay đổi căn bản khả năng tiếp cận, thúc đẩy tái phân bố không gian và các nguồn lực kinh tế (Lan Wang, 2019), tạo ra lợi thế vị trí mới cho các đô thị trong mạng lưới, đặc biệt là các ngành kinh tế tri thức, du lịch và hội nghị (Van den Berg, 1998).

Tác động của ĐSTĐC phân hóa rõ rệt theo thời gian di chuyển giữa nhà ga và các cực đô thị trung tâm: (1) Phạm vi ≤ 1 giờ: Thúc đẩy mạnh mẽ kinh tế tri thức và hiệu ứng lan tỏa; (2) Phạm vi 1,5 - 2,5 giờ: Hình thành các trung tâm giao thông quan trọng, giảm áp lực đô thị hóa quá mức cho trung tâm đô thị;(3) Phạm vi > 2,5 giờ: Tác động yếu, chủ yếu phục vụ du lịch ngắn ngày (Chia-Lin Chen, 2011).

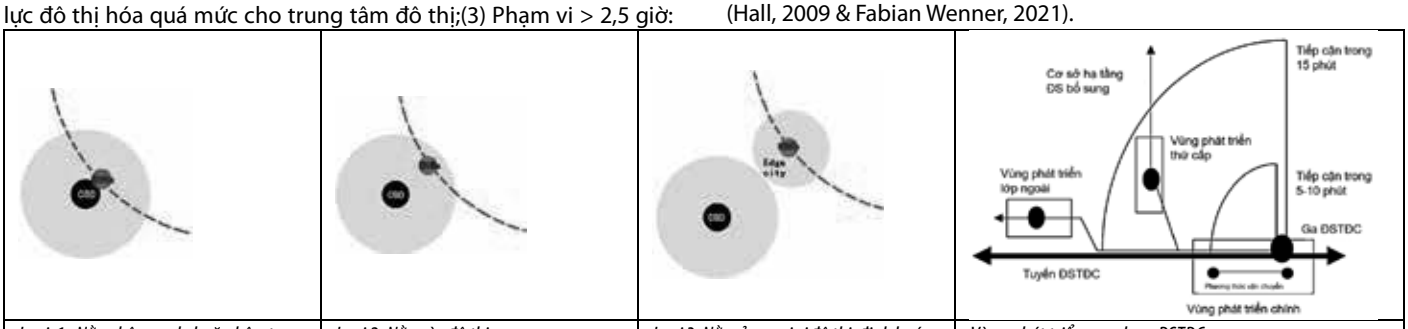
Mặc dù ĐSTĐC củng cố vai trò trung tâm của các siêu đô thị, nó cũng gây ra hiện tượng "phân cực không gian": các đô thị lớn thu hút mạnh mẽ nguồn lực từ khu vực lân cận, trong khi đô thị nhỏ có nguy cơ suy yếu (Shenghuan Zhao, 2017). Tuy nhiên, các vùng không có ĐSTĐC vẫn có thể duy trì tăng trưởng nếu cải thiện tốt kết nối bằng các phương thức khác như đường cao tốc, đường sắt đô thị (Greenguage21, 2006). ĐSTĐC còn thúc đẩy quá trình đô thị hóa ngoại ô, cho phép dân cư chuyển dịch ra ngoại ô nhưng vẫn duy trì kết nối việc làm với lõi đô thị (Peter Hall, 2016 & Chia-Lin Chen, 2011).

Ở cấp độ đô thị, ĐSTĐC đóng vai trò "chất xúc tác" cho việc hình thành các điểm trung tâm kinh tế mới quanh nhà ga (J. M. Robert Cervero, 2009). Hiệu quả của mô hình này phụ thuộc vào hai yếu tố then chốt: (1) Mức độ dịch vụ: Tần suất dừng tàu tỉ lệ thuận với sức mạnh kinh tế và nhu cầu của đô thị (Greenguage21, 2006); (2) Tính kết nối: Vị trí nhà ga cần gắn liền với khu hiện hữu và tích hợp giao thông đa phương thức để tối ưu hóa khả năng tiếp cận (Lan Wang, 2019).

Trong phạm vi từ 400 m đến 3.000 m quanh ga, hạ tầng giao thông ĐSTĐC tác động trực tiếp đến sử dụng đất và giá trị bất động sản (Daniel Baldwin Hess, 2007). Quy hoạch khu vực này thường bám sát mô hình Phát triển định hướng giao thông công cộng (TOD) với các đặc trưng: (1) Mật độ cao và sử dụng đất hỗn hợp; (2) Ưu tiên không gian công cộng và môi trường thân thiện với người đi bộ; (3) Tích hợp các dịch vụ công cộng và chức năng đô thị ngay tại nhà ga (Lan Wang, 2019).

2.2. Mô hình phát triển không gian quanh ga ĐSTĐC

Sự phát triển không gian quanh ga ĐSTĐC phụ thuộc vị trí ga trong cấu trúc đô thị: (1) Ga nội đô - ga ĐSTĐC nằm trong hoặc tiếp giáp khu trung tâm tài chính thương mại (Central Business District - CBD), đóng vai trò củng cố và gia tăng sức hấp dẫn của trung tâm hiện hữu. Bản chất việc phát triển quanh ga chủ yếu là tái thiết đô thị, chuyển đổi các khu công nghiệp suy thoái cũ thành tổ hợp đa chức năng mang tính biểu tượng; (2) Ga vùng rìa: ga ĐSTĐC được bố trí ở rìa, tạo điều kiện hình thành các cực đô thị mới hoặc các tiểu trung tâm chức năng, qua đó mở rộng đô thị mà không làm suy giảm vai trò của lõi trung tâm hiện hữu. Đây là khu vực chứng kiến sự chuyển đổi mục đích sử dụng đất mạnh mẽ nhất do quỹ đất trống dồi dào, phù hợp phát triển khu công nghiệp và thương mại mới; (3) Ga ngoại ô - ga ĐSTĐC nằm ngoài ranh giới đô thị hiện hữu, được định hướng là nền tảng phát triển của các đô thị mới hoặc các khu thương mại mới ở vùng ngoại vi. Đây là mô hình mang tính tham vọng cao, trong đó ga ĐSTĐC được xem như hạt nhân hình thành các "edge cities" những cực tăng trưởng kinh tế và thương mại mới (Hall, 2009 & Fabian Wenner, 2021).



Loại 1: Nằm bên cạnh hoặc bên trong khu trung tâm thương mại truyền thống (CBD)	*Loại 2: Nằm rìa đô thị*	*Loại 3: Nằm ở ngoại vi đô thị, định hướng phát triển khu thương mại hay đô thị mới (Edge City)*	*Vùng phát triển quanh ga ĐSTĐC*

Hình 1. Các loại ga và vùng phát triển quanh ga *(Nguồn: Hall, 2009)*

Vùng phát triển quanh ga có các ngưỡng phổ biến là dạng vùng đệm thường dao động từ 500 m đến 800 m và đôi khi lên tới 1 km (Noriko Otsuka, 2019). Các nghiên cứu đồng thuận rằng tác động của ĐSTĐC mang tính cục bộ và tuân theo quy luật suy giảm nhanh theo khoảng cách từ tâm ga (Michiel Meeteren van, 2016). Tác động mạnh nhất của ĐSTĐC thường tập trung ở vùng lõi, nơi hưởng lợi trực tiếp nhất về thời gian di chuyển và khả năng tiếp cận. Tại đây, các văn phòng cao cấp, khu dân cư chất lượng cao có thể được hình thành, giá đất và bất động sản tăng đáng kể, thu hút xây dựng dày đặc và chất lượng cao. Các vùng thứ cấp cũng có thể phát triển các chức năng quan trọng nhưng với giá trị bất động sản và mật độ xây dựng thấp hơn, khiến nhà đầu tư ít mặn mà hơn, dù vẫn có thể đầu tư ở giai đoạn sau. Vùng ảnh hưởng có thể được hưởng lợi về khả năng tiếp cận nhưng hiếm khi thấy các tác động phát triển trực tiếp từ ĐSTĐC (P. M. Pol, 2002). Không gian phát triển thường phân hóa thành ba vùng đặc trưng: (1) Vùng lõi (0 - 800/1.000 m): Mật độ xây dựng cao nhất, tập trung các dịch vụ giá trị gia tăng, văn phòng, trung tâm thương mại và khách sạn. Đây là khu vực thực hiện mô hình "Nút - Địa điểm" (Node-Place) rõ nét nhất; (2) Vùng phát triển thứ cấp (1.000 - 1.500 m): Chuyển dần sang hỗn hợp văn phòng và khu dân cư cao cấp; (3) Vùng ảnh hưởng (1.500 – 3.000 m): Chủ yếu là khu dân cư và dịch vụ đời sống, cường độ phát triển giảm mạnh. Sau khi ga vận hành, xu hướng dịch chuyển các hoạt động kinh tế từ vùng ngoại vi vào vùng lõi và vùng ảnh hưởng rất rõ rệt.

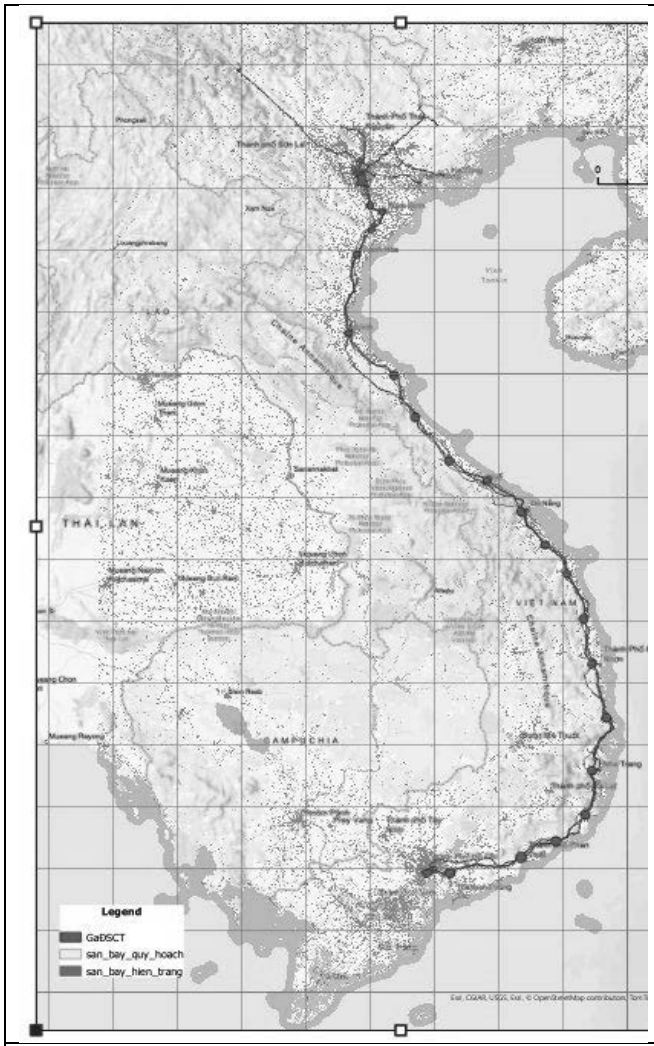
Sự tác động của ĐSTĐC không diễn ra tức thì mà có độ trễ so với quá trình vận hành ga. Sự phát triển khu vực quanh ga vẫn chịu sự chi phối của chu kỳ kinh tế vĩ mô thay vì chỉ dựa vào hạ tầng giao thông đơn thuần. (Fabian Wenner, 2021)

Quá trình phát triển khu vực quanh ga tập trung vào bốn khía cạnh chiến lược: (1) nâng cao chất lượng không gian công cộng và xây dựng các công trình mang tính biểu tượng nhằm tái định vị hình ảnh đô thị; (2) ưu tiên mô hình phát triển hỗn hợp (văn phòng, thương mại, nhà ở) nhằm tối ưu hóa giá trị gia tăng từ vị trí; (3) tăng cường khả năng kết nối đa phương thức và tích hợp vật lý giữa nhà ga với cấu trúc đô thị hiện hữu; và (4) thiết lập các cơ chế quy hoạch dài hạn dựa trên sự đồng thuận của các bên liên quan. Tuy nhiên, hiệu quả thực tế của ĐSTĐC không mang tính đồng nhất mà phụ thuộc mật thiết vào đặc thù địa phương, quy mô mạng lưới và hệ thống chính sách quản lý cụ thể của từng thành phố. (Fabian Wenner, 2021)

3. ĐẶC ĐIỂM HỆ THỐNG GA ĐSTĐC BẮC - NAM TẠI VIỆT NAM

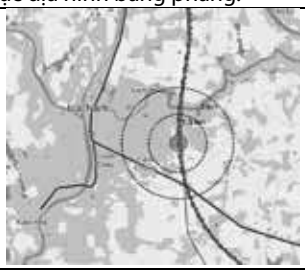
3.1. Vị trí và mối liên hệ giữa nhà ga với khu vực đô thị hiện hữu

Hướng tuyến và vị trí 23 ga hành khách của tuyến ĐSTĐC cơ bản được xác định ở Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi của dự án, với cự ly trung bình giữa các ga khoảng 67 km. Các ga đều được xây dựng mới, hầu như được bố trí ở khu vực địa hình bằng phẳng.

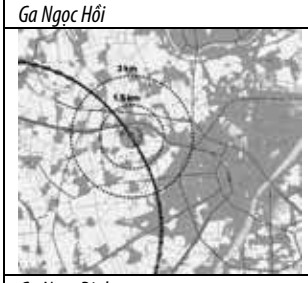


Hệ thống ga ĐSTĐC Bắc Nam

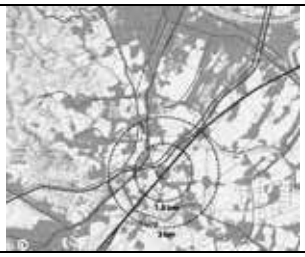
Ga Ngọc Hồi



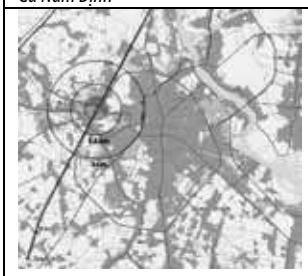
Ga Hà Nam



Ga Nam Định

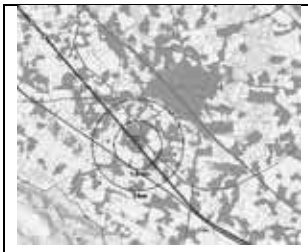


Ga Ninh Bình

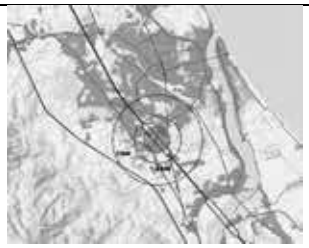


Ga Thanh Hóa

Ga Vinh


Ga Hà Tĩnh

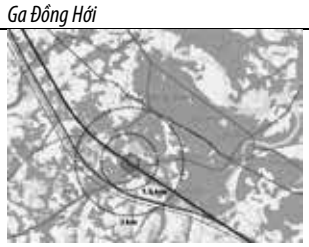
Ga Vũng Áng

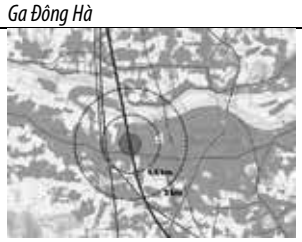

Ga Đồng Hới

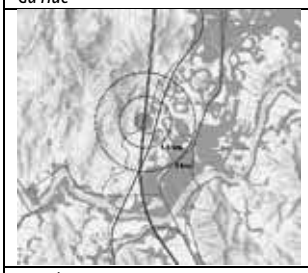
Ga Đông Hà

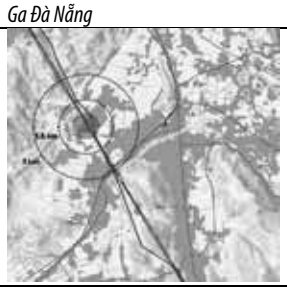
Ga Huế

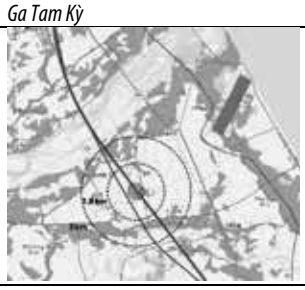
Ga Đà Nẵng

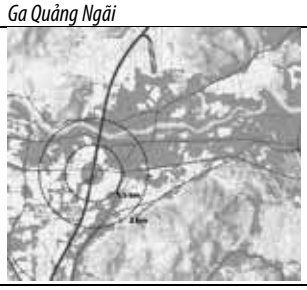

Ga Tam Kỳ

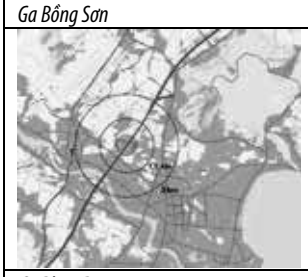

Ga Quảng Ngãi


Ga Bồng Sơn


Ga Diêu Trì


Ga Tuy Hòa

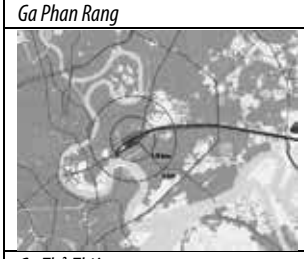

Ga Diên Khánh


Ga Phan Rang

Ga Phan Rí

Ga Mương Mán

Ga Long Thành


Ga Thủ Thiêm

Hình 2. Vị trí các ga ĐSTĐC Bắc - Nam *(Nguồn: Liên danh tư vấn Tedi, 2024)*

Các nhân tố mang tính quyết định đối với sự phát triển của khu vực lân cận nhà ga bao gồm: đặc điểm khai thác dừng đỗ, phân loại cấp đô thị kết nối, và vị trí không gian tương đối của nhà ga so với đô thị hiện hữu, được thống kê và trình bày chi tiết tại Bảng 1:

Bảng 1. Tổng hợp đặc điểm các ga ĐSTĐC

TT	Tên ga	Cự ly các ga (km)	Đặc điểm tàu dừng	Tỉnh	Đô thị kết nối	Loại đô thị	Khoảng cách đến trung tâm đô thị lịch sử (km)	Khoảng cách đến biên phát triển đô thị (km)
1	Ngọc Hồi	0	Các tàu đều dừng	Hà Nội	Hà Nội	Đặc biệt	15	8
2	Hà Nam	44,5		Ninh Bình	TP Phủ Lý	II	4,3	0
3	Nam Định	23,1			TP Nam Định	II	5,5	2,2
4	Ninh Bình	35,2			TP Hoa Lư	II	8,2	3
5	Thanh Hóa	47,7		Thanh Hóa	TP Thanh Hóa	II	4,5	1
6	Vinh	130,6	Các tàu đều dừng	Nghệ An	TP Vinh	II	7,2	4
7	Hà Tĩnh	51,2		Hà Tĩnh	TP Hà Tĩnh	II	4	2,5

8	Vũng Áng	57,9			Thị xã Kỳ Anh	II	2,5	1
9	Đồng Hới	76,7		Quảng Trị	TP Đồng Hới	II	3,5	0
10	Đông Hà	89,3			TP Đông Hà	II	3,5	0
11	Huế	64,7		Huế	TP Huế	I	6	3,5
12	Đà Nẵng	79,8	Các tàu đều dừng	Đà Nẵng	TP Đà Nẵng	I	11	5,2
13	Tam Kỳ	68			TP Tam Kỳ	II	4,3	2
14	Quảng Ngãi	61,1		Quảng Ngãi	TP Quảng Ngãi	II	3,9	0
15	Bồng Sơn	80,4		Gia Lai	Thị xã Hoài Nhơn	II	3,5	1,9
16	Diêu Trì	77,1			TP Quy Nhơn	II	13,5	9
17	Tuy Hòa	92,4		Phú Yên	TP Tuy Hòa	II	10,9	3,5
					Thị xã Đông Hòa	III	4,5	3,2
18	Diên Khánh	100,4	Các tàu đều dừng	Khánh Hòa	TT Diên Khánh	III	2	1,5
19	Tháp Chàm	77,6			TP Phan Rang - Tháp Chàm	II	3,5	2,5
20	Phan Rí	66,7		Lâm Đồng	TX Phan Rí Cửa	III	4,5	3
21	Mương Mán	69,4			TP Phan Thiết	II	11	6,5
22	Long Thành	112,1		Đồng Nai	TT Long Thành	III	10	8
23	Thủ Thiêm	34,7	Các tàu đều dừng	TP.HCM	TP.HCM	Đặc biệt	6	0

Theo vị trí của ga đối với đô thị có thể chia làm 3 loại ga: (1) 01 ga (chiếm tỷ lệ 4,3%) thuộc khu vực trung tâm mật độ cao: ga Thủ Thiêm, TP.HCM, đây là điểm đầu mối nằm trong lõi đô thị phát triển mật độ cao; (2) 04 ga nằm ở khu vực rìa đô thị: ga Hà Nam, Đồng Hới, Đông Hà, Quảng Ngãi, chiếm 17,4%; (3) 18 ga còn lại (chiếm 78,3%) nằm ngoài đô thị, phản ánh xu hướng tuyến đi qua các vùng nông nghiệp hoặc khu vực chưa đô thị hóa.

Sự phân bổ chiến lược của mạng lưới ĐSTĐC không hoàn toàn phụ thuộc vào quy mô cấp đô thị. Mặc dù nhóm đô thị loại II chiếm áp đảo về số lượng (16 ga, tương đương 69,6%), nhưng chỉ có duy nhất ga Vinh được định vị là điểm "Các tàu đều dừng".

Ngược lại, 100% các đô thị loại đặc biệt (Ngọc Hồi, Thủ Thiêm) đều là các ga trung tâm, phản ánh vai trò đầu kéo kinh tế vĩ mô của hai đầu cực Bắc - Nam.

Điểm đáng chú ý là sự xuất hiện của ga Diên Khánh (đô thị loại III) trong nhóm "Các tàu đều dừng" chứng tỏ sự ưu tiên lớn cho phát triển trung tâm du lịch Nam Trung Bộ trong hoạch định mạng lưới điểm dừng tốc hành.

3.2. Hiện trạng sử dụng đất xung quanh ga

Việc phân tích hiện trạng sử dụng đất khu vực 3 km quanh các ga cho thấy sự phân hóa rõ rệt về tiềm năng khai thác quỹ đất (Bảng 2).

Bảng2. Hiện trạng sử dụng đất quanh ga

Nhóm đặc điểm	Ga	Hiện trạng sử dụng đất 3 km quanh ga
Nhóm hỗn hợp công nghiệp - dịch vụ	03 ga Nam Định, Vinh, Thanh Hóa (chiếm 13,0%)	Đất khu công nghiệp (KCN) và dịch vụ phụ trợ KCN, xen cài đất khu dân cư hiện hữu và nông nghiệp
Nhóm tập trung hạ tầng công cộng	Hà Nam	Tập trung nhiều công trình công cộng trọng điểm: 02 bệnh viện Trung Ương, bến xe liên tỉnh, đất ở đô thị và đất làng xã, nông nghiệp
Nhóm hạ tầng kỹ thuật đặc biệt	Long Thành	Nằm trong khu vực phát triển sân bay Long Thành và các chức năng phụ trợ và dịch vụ hàng không của sân bay Long Thành.
Nhóm xây dựng mật độ cao	Thủ Thiêm	Đất ở đô thị mật độ cao, thuộc khu vực trung tâm tài chính - đô thị mới.
Nhóm quỹ đất dự trữ lớn	15 ga (chiếm 65,2%)	Chủ yếu là đất ở làng xã mật độ thấp và đất nông nghiệp

3.3. Tích hợp quy hoạch ĐSTĐC trong quy hoạch tỉnh

Mặc dù các đồ án quy hoạch tỉnh phê duyệt trước tháng 7/2025 đều đã xác định hướng tuyến và vị trí nhà ga ĐSTĐC, nhưng phần lớn vẫn tồn tại hạn chế trong việc xác định quy mô, cấu trúc và tính chất không gian vùng phụ cận. Hiện nay, chỉ có 05 địa phương bước đầu định hình mô hình phát triển không gian xung quanh nhà ga:

1. Hà Nội: Quy hoạch khu vực phát triển ga Ngọc Hồi theo mô hình phát triển đô thị gắn với giao thông công cộng (TOD) với quy mô khoảng 250 ha, gồm ga ĐSTĐC, hệ thống đường sắt đô thị, depot và các khu chức năng thương mại - dịch vụ.

2. Huế: Quy hoạch đã xác định hình thành khu vực TOD Phú Mỹ, tuy nhiên, các chỉ tiêu về quy mô diện tích và cấu trúc không gian chi tiết hiện vẫn chưa được làm rõ trong đồ án.

3. Đà Nẵng: Ga ĐSTĐC kết hợp với ga đường sắt quốc gia (di dời khỏi trung tâm hiện hữu), đóng vai trò là hạt nhân hình thành trung tâm phụ của đô thị, thúc đẩy tái cấu trúc không gian đô thị về phía Tây và Nam thành phố.

4. Đồng Nai: ga ĐSTĐC nằm trong khu vực Cảng hàng không quốc tế Long Thành, định hướng phát triển gắn liền với mô hình đô thị sân bay, tạo thành đầu mối giao thông đa phương thức cấp quốc tế.

5. TP.HCM: Nhà ga được bố trí tại lõi trung tâm phát triển, kết hợp với ga ĐSĐT trên khu vực diện tích khoảng 17 ha, tái phát triển không gian đô thị hiện hữu theo mô hình TOD.

3.4. Động lực kép: giá trị Kinh tế và Văn hóa bản địa

Tuyến ĐSTĐC chạy song song với chuỗi các khu kinh tế ven biển, hệ thống cảng, công nghiệp, hệ sinh thái biển đa dạng, qua đó, tạo ra tiềm năng mạnh mẽ cho các dịch vụ hậu cần cảng, logistics, du lịch biển. Để tối ưu hóa hiệu quả đầu tư, không gian phát triển xung quanh mỗi nhà ga cần nhận diện các động lực phát triển riêng. Đơn

cử như tại các ga gắn liền với cực tăng trưởng công nghiệp biển (Hà Tĩnh, Quảng Ngãi), cần phát triển gắn với trung tâm giao thương, logistics kết hợp đô thị dịch vụ; ngược lại, tại các ga sở hữu cảnh quan vịnh biển đẹp (như Nha Trang, Phan Thiết), cần nghiên cứu đẩy mạnh lực hút là kinh tế du lịch.

Xuyên suốt gần 1.600 km, hệ thống nhà ga cắt ngang qua những dải trầm tích văn hóa đa dạng: từ không gian văn hóa châu thổ sông Hồng, quần thể di sản cố đô Huế, đến hệ sinh thái văn hóa Chăm Pa tại Nam Trung Bộ. Sự đan xen phức hợp giữa lợi thế kinh tế biển và đặc trưng văn hóa lịch sử khẳng định nguyên tắc quy hoạch về việc phát triển mô hình quy hoạch các khu vực quanh ga phải gắn liền với triết lý tôn trọng "tính nơi chốn". Tính bản địa riêng biệt này chính là nhân tố "tạo thị" quyết định sức hấp dẫn, giúp khu vực quanh ga thu hút vốn đầu tư và định hình bản sắc năng lực cạnh tranh cho từng địa phương dọc tuyến.

4. KẾT LUẬN VÀ THẢO LUẬN

Khu vực quanh các nhà ga ĐSTĐC đang có sự chuyển dịch mạnh mẽ từ chức năng không gian giao thông đơn thuần sang các "trung tâm hỗn hợp" đa năng bao gồm văn phòng, bán lẻ và văn hóa. Tại châu Âu, hệ thống ĐSTĐC phát triển trên nền tảng cấu trúc đô thị đã ổn định, chủ yếu tận dụng các ga trung tâm hiện hữu như một lớp hạ tầng bổ sung để tái thiết đô thị và tăng cường kết nối vùng. Trong khi đó, tại châu Á, hệ thống này được coi là động lực cốt lõi để thiết lập các không gian đô thị mới, tái cấu trúc mạng lưới đô thị. Tuy nhiên, thực tiễn từ các quốc gia đi trước cũng để lại bài học cảnh báo sâu sắc về rủi ro hình thành các "đô thị ma" nếu hạ tầng được xây dựng nhưng lại thiếu vắng các hoạt động kinh tế - xã hội và dân cư sinh sống thực chất.

Tại Việt Nam, tuyến ĐSTĐC Bắc - Nam không chỉ là một công trình hạ tầng giao thông trọng điểm quốc gia mà còn đóng vai trò là động lực chiến lược cho phát triển kinh tế - xã hội và quy hoạch đô thị, đặc điểm bối cảnh của 23 ga hành khách xây dựng mới có sự phân hóa và khác biệt rất lớn. Với đặc điểm vị trí từng ga, hướng tuyến chạy dọc bờ biển quốc gia mang lại cho các khu vực quanh ga những lợi thế vô cùng đa dạng, từ phát triển du lịch, kinh tế biển cho đến khả năng kết nối linh hoạt với các khu công nghiệp và khai thác đặc điểm văn hóa lịch sử của từng địa phương. Chính sự khác biệt đặc thù về vị trí và lợi thế này dẫn đến yêu cầu cấp thiết là phải xác định rõ tiềm năng phát triển riêng biệt của từng ga, là cơ sở để định hướng phát triển và xác định mô hình quy hoạch không gian phù hợp. Đặc biệt, trong bối cảnh quy mô, cấu trúc và tính chất không gian quanh các ga ĐSTĐC chưa được xác lập, việc khẩn trương đề xuất cơ sở quy hoạch là điều kiện tiên quyết để khai thác tối đa giá trị kinh tế đất đai và tối ưu hóa nguồn lực từ dự án hạ tầng trọng điểm này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Biyue Wang, et al. Planning and developing a high-speed railway new town under state entrepreneurialism in China. Urban Geography, 45, 2022, doi:10.1080/02723638.2022.2148501

[2] Chia-Lin Chen, Peter Hall. The impacts of high-speed trains on British economic geography: a study of the UK's InterCity 125/225 and its effects. Journal of Transport Geography, 19(4), 689-704, 2011, doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.08.010

[3] Daniel Baldwin Hess. Impact of Proximity to Light Rail Rapid Transit on Station-Area Property Values in Buffalo, New York. Urban Studies, 44(5), 1041-1068, 2007, doi:10.1080/00420980701256005

[4] Ennio Cascetta et al. Analysis of mobility impacts of the high speed Rome-Naples rail link using withinday dynamic mode service choice models. Journal of Transport Geography, 19(14), 635-643, 2011, doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.07.001.

[5] Fabian Wenner, Alain Thierstein. High speed rail as urban generator? An analysis of land use change around European stations. European Planning Studies, 30(2), 2021, doi:10.1080/09654313.2021.1946485

[6] Greenguage21. High speed trains and the development and regeneration of cities, 2006.

[7] Juan Bautista Font Torres et al. Spatial Adaptation of Railway Stations: Arrival of High-Speed Rail Network. Infrastructures, 10(4), 2025, doi:10.3390/infrastructures10040091

[8] Lan Wang, Hao Gu. Studies on China's High-Speed Rail New Town Planning and Development. Tongji University Press, Shanghai, China, 2019, doi:10.1007/978-981-13-6916-2

[9] Leboeuf Michel. High speed rail fast tract to sustainable mobility. Retrieved from https://www.uic.org/com/IMG/pdf/uic_high_speed_brochure.pdf, 2018.

[10] Lei Dong et al. "Ghost cities" versus boom towns: Do China's high-speed rail new towns thrive? Regional Science and Urban Economics, 89, 2021, doi:10.1016/j.regsciurbeco.2021.103682

[11] Luật Đường sắt, 2025.

[12] Liên danh tư vấn Tedi. Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc Nam, 2024.

[13] Michiel Meeteren van, Zachary Neal, Ben Derudder. Disentangling agglomeration and network externalities: A conceptual typology. Papers in Regional Science, 95(1), 2016, doi:10.1111/pirs.12214

[14] Peter Hall. Magic Carpets and Seamless Webs: Opportunities and Constraints for High-Speed Trains in Europe. Built Environment, 35(1), 59-69, 2009.

[15] Pol Peter MJ. A renaissance of stations, railways and cities. Economic effects, development strategies and organisational issues of European high-speed-train stations, 2002.

[16] Qizhou Hu, Siyuan Qu. A Brief History of High-Speed Rail, 2023, doi:10.1007/978-981-19-3635-7

[17] Sun Hong. High-speed railway as a tool for (re) making cities in China. Paper presented at the The Ideal City: between myth and reality. Representations, policies, contradictions and challenges for tomorrow's urban life, Urbino (Italy), 2015.

[18] Van den Berg, Leo Pol, Peter. The European high-speed train and urban development, 1998.

[19] Vickerman, Roger. High-speed rail and regional development: the case of intermediate stations. Journal of Transport Geography, 42, 157-165, 2014.

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nhận diện cấu trúc nền tảng cho định hướng phát triển không gian đô thị Hà Nội

Identifying the foundational structures for guiding Hanoi's urban spatial development

> GS.TS.KTS DOÃN MINH KHÔI[1], KTS CAO THÀNH NGHIỆP[2,*]
[1]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[2]Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[*]Email: ktscaothanhnghiep@gmail.com

TÓM TẮT

Hà Nội là đô thị lịch sử tiêu biểu của vùng châu thổ sông Hồng, được hình thành và phát triển trong mối quan hệ chặt chẽ với hệ thống sông, hồ. Trong tiến trình lịch sử, hệ thống mặt nước làm nền tảng cho tổ chức cấu trúc không gian, chi phối sự hình thành thị và đô. Tuy nhiên, quá trình đô thị hóa nhanh hiện nay làm suy giảm mối liên kết giữa đô thị và hệ thống sông hồ, nguy cơ đứt gãy cấu trúc hình thái và mất dần bản sắc.

Bài báo sử dụng phương pháp phân tích hình thái đô thị kết hợp tiếp cận lịch sử - không gian để nhận diện cấu trúc nền tảng không gian đô thị Hà Nội. Kết quả nghiên cứu cho thấy cấu trúc đô thị Hà Nội hình thành trên nền tảng "đô thị sông nước", với các không gian phát triển dọc theo hệ thống sông hồ. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất định hướng phát triển không gian theo hướng phục hồi liên kết thủy hệ, bảo tồn cấu trúc lịch sử và tăng cường vai trò của không gian cây xanh - mặt nước trong tổ chức đô thị.

Từ khóa: Nhận diện; cấu trúc nền tảng; đô thị sông nước; cấu trúc không gian đô thị; hạ tầng xanh - mặt nước.

ABSTRACT

Hanoi is a representative historical city of the Red River Delta, formed and developed in close relation to its river and lake systems. Throughout history, water bodies have served as the foundational framework structuring urban space, shaping the formation of both commercial areas and administrative centers. However, rapid urbanization has weakened the connection between the city and its hydrological system, posing risks of morphological fragmentation and gradual loss of urban identity.

This paper employs urban morphological analysis combined with a historical–spatial approach to identify the morphological identity of Hanoi. The findings indicate that the urban structure has been established upon a water-based urban system, with spatial development patterns aligned along rivers and lakes. Based on these results, the study proposes spatial development orientations focusing on restoring hydrological linkages, preserving historical structures, and enhancing the role of green and blue spaces in urban organization.

Keywords: Identification; foundational structure; water-based urbanism; urban spatial structure; Green-blue infrastructure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hà Nội là đô thị lịch sử tiêu biểu của vùng châu thổ sông Hồng, được hình thành và phát triển trong mối quan hệ chặt chẽ với hệ thống sông, hồ, rừng - một Hà Nội thiên nhiên hoang dã, đã trải qua ít nhất là ba loại cảnh quan: vịnh biển (triệu năm) - phá (vạn năm) - đầm lầy (TCN). [4]. Trong tiến trình phát triển đô thị Việt Nam, Thăng Long - Hà Nội không phải là một đô thị được kiến tạo thuần túy bởi ý chí hành chính, mà là kết quả của sự lựa chọn không gian dựa trên các yếu tố địa - thủy - sinh thái đặc thù của vùng đồng bằng châu thổ. Ngay từ thời điểm định đô Thăng Long, yếu tố địa thế và hệ thống sông nước đã được nhận diện như nền tảng tổ chức cấu trúc không gian, với hình ảnh "*núi là vạt áo che, sông là dải đai thắt, sau lưng là sông nước, trước mặt là biển*" [1].

Hình 1. Sơ đồ các thành cổ bên bờ sông Hồng

Cấu trúc không gian của Thăng Long được tổ chức như một chỉnh thể địa - thủy, rừng liên hoàn, trong đó hệ thống sông Hồng, sông Tô Lịch cùng các hồ tự nhiên như Hồ Tây, Hồ Gươm, Trúc Bạch không chỉ đóng vai trò phòng thủ tự nhiên mà còn là trục tổ chức không gian cư trú, thương mại và giao thông. Thăng Long - Kẻ Chợ là một "đô thị sông nước", nơi cấu trúc làng - chợ - phố nghề phát triển dựa trên hệ thống thủy lộ, phản ánh sự gắn bó hữu cơ giữa cư trú, sản xuất và trao đổi. Các đơn vị "kẻ" như Kẻ Chợ, Kẻ Bưởi, Kẻ Láng, Kẻ Mọc… tồn tại như những tế bào hình thái cơ bản, cho thấy cấu trúc đô thị được hình thành từ các yếu tố đô và thị được thiết lập và chồng lớp lên sau.

Hình 2. Bản đồ đê điều Bắc Kỳ thời Pháp thuộc. *Nguồn: Trung tâm Lưu trữ Quốc gia I [6]*

Tuy nhiên, trong bối cảnh quá trình đô thị hóa tăng tốc như hiện nay, không gian hành chính và sự gia tăng mật độ xây dựng đang làm suy giảm mối liên kết giữa đô thị và hệ thống sông hồ, cảnh quan. Nhiều không gian mặt nước bị lấp đầy hoặc thu hẹp, dẫn đến nguy cơ đứt gãy hình thái đô thị và suy giảm bản sắc không gian đặc trưng. Việc nghiên cứu phát triển Hà Nội cần thiết phải làm rõ cấu trúc hình thái đô thị của nó như một hệ thống không gian động trong quá trình biến đổi và chuyển hóa, một cấu trúc đô thị luôn gắn liền với hệ thống sông hồ, được tích lũy qua nhiều lớp, thì mới có thể phát triển bền vững.

Trên cơ sở đó, bài nghiên cứu tiếp cận Hà Nội như một thực thể hình thái đô thị được hình thành và biến đổi trong mối quan hệ chặt chẽ giữa yếu tố tự nhiên và cấu trúc không gian. Phương pháp nghiên cứu dựa trên phân tích hình thái đô thị kết hợp tiếp cận lịch sử - địa lý nhằm nhận diện các lớp cấu trúc và quy luật phát triển của đô thị qua các giai đoạn phát triển.

Mục tiêu của bài nghiên cứu là nhận diện bản sắc hình thái đô thị Hà Nội thông qua việc làm rõ mối quan hệ giữa hệ sinh thái sông hồ, với tổ chức không gian đô thị. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất định hướng phát triển không gian theo hướng phục hồi liên kết thủy hệ, bảo tồn cấu trúc lịch sử và tăng cường vai trò của hạ tầng xanh - nước, hướng tới mô hình "rừng trong trong thành phố, thành phố trong rừng" trong cấu trúc đô thị hiện đại.

2. QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH VÀ BIẾN ĐỔI HÌNH THÁI ĐÔ THỊ HÀ NỘI

2.1. Giai đoạn tiền đô thị (trước 1010)

Trước khi trở thành kinh đô, khu vực Hà Nội hiện nay tồn tại dưới dạng một hệ thống tiền đô thị gắn với các "kẻ" - đơn vị cư trú, kinh tế đặc trưng của vùng châu thổ sông Hồng. Các "kẻ" như Kẻ Chèm (Từ Liêm), Kẻ Bưởi (Tây Hồ), Kẻ Láng (Đống Đa), Kẻ Vọng (Hai Bà Trưng), Kẻ Mọc (Thanh Xuân) hình thành dọc theo các tuyến thủy hệ quan trọng, bao gồm sông Hồng, sông Tô Lịch, sông Kim Ngưu. Cấu trúc không gian thời kỳ này không mang tính đô thị hoàn chỉnh mà tồn tại dưới dạng các cụm dân cư phân tán, liên kết bởi mạng lưới sông ngòi đóng vai trò là trục giao thông và thương mại chính. Đặc điểm nổi bật của giai đoạn này là sự tồn tại của thương mại đường sông, trong đó các hoạt động kinh tế chủ yếu diễn ra dọc theo bờ sông. "*Đô thị bắt đầu từ con sông, cũng đồng nghĩa với sự hình thành của làng và chợ ven sông*" [3] thay vì không gian quảng trường hay trục đường bộ như đô thị phương Tây. Chính cấu trúc này tạo nên một dạng hình thái tiền đô thị đặc trưng, trong đó "thị" hình thành trước "đô".

Từ góc độ hình thái học đô thị, có thể nhận diện rõ ba yếu tố:

(i) mạng lưới thủy hệ đóng vai trò là khung cấu trúc chính;

(ii) các "kẻ" là đơn vị cư trú - sản xuất; và

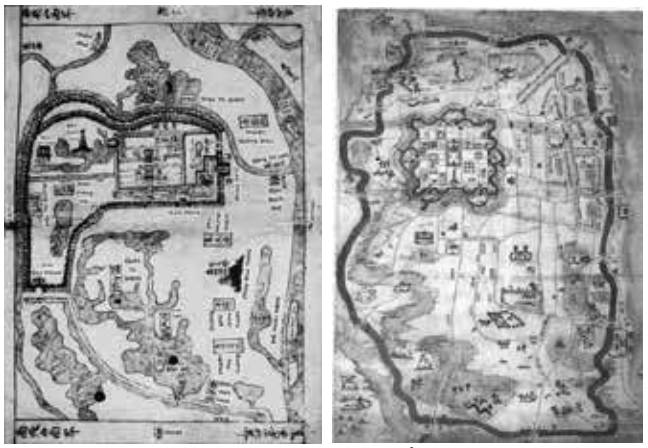
(iii) các chợ ven sông là nút giao thương.

Cấu trúc này tạo tiền đề cho sự hình thành một trung tâm đô thị tập trung sau này, khi quyền lực chính trị được thiết lập trên nền tảng các mạng lưới kinh tế - dân cư đã tồn tại.

2.2. Giai đoạn hình thành Thăng Long (1010-1802)

Năm 1010, khi Lý Công Uẩn quyết định dời đô từ Hoa Lư ra Thành Đại La và đặt tên là Thăng Long, một bước chuyển mang tính quyết định đã diễn ra: từ cấu trúc tiền đô thị phân tán sang một đô thị có tổ chức quyền lực tập trung

Cấu trúc không gian Thăng Long được thiết lập theo mô hình phân lớp rõ rệt, bao gồm: Hoàng thành (trung tâm quyền lực), khu dân cư - phố phường (khu vực sản xuất - thương mại), và hệ thống làng ven đô. Hoàng thành được bố trí trên khu đất cao, gần sông Hồng, tận dụng lợi thế "bối sơn diện thủy", trong khi khu dân cư phát triển về phía đông và đông nam, dọc theo các tuyến sông như sông Tô Lịch và sông Kim Ngưu. "*Sông hồ là nguồn nước mặt cho sinh hoạt mà cũng là hệ thống thủy lợi và giao thông truyền thống. Sông hồ cũng là những sự kiện địa lý được dùng làm nguyên lý sơ khởi chỉ đạo việc quy tụ xóm làng, phường phố và thành lũy phòng vệ* " [4]. Hệ thống phố nghề (36 phố phường) dần hình thành, gắn với các làng nghề chuyên biệt như làng Bát Tràng (gốm), làng Nghi Tàm (trồng hoa), làng Ngũ Xã (đúc đồng). Các tuyến phố như Hàng Bạc, Hàng Đào, Hàng Thiếc phản ánh rõ cấu trúc kinh tế - không gian theo ngành nghề, trong đó mỗi phố vừa là nơi sản xuất vừa là nơi buôn bán.



Hình 3. Bản đồ Thăng Long thời Hồng Đức (1490) thể hiện Đô chồng lên Thị. *Nguồn [5]*

Về mặt hình thái, Thăng Long thể hiện rõ sự chuyển đổi từ cấu trúc "thủy hệ chi phối" sang cấu trúc "Thủy hệ kết hợp hành chính chi phối", trong đó Hoàng thành là trung tâm tổ chức không gian nhưng mạng lưới sông ngòi vẫn duy trì vai trò quan trọng trong giao thông và thoát nước, tạo nên một cấu trúc đô thị - thủy hệ tích hợp. Sự hình thành Thăng Long đánh dấu quá trình "Đô chồng lên Thị",

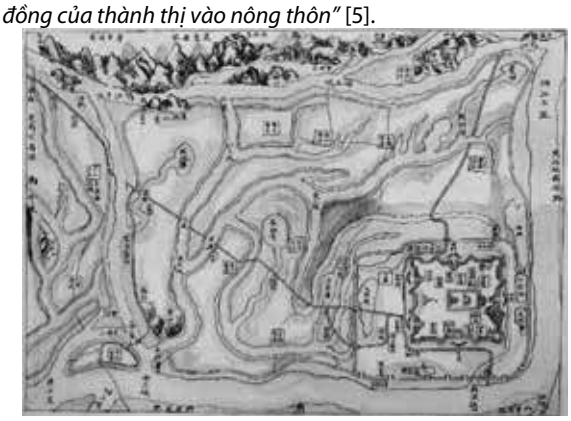
trong đó cấu trúc quyền lực được đặt lên nền tảng các mạng lưới kinh tế - dân cư đã tồn tại trước đó.

2.3. Giai đoạn nhà Nguyễn (1802-1883)

Dưới triều Nguyễn, mặc dù kinh đô chuyển vào Huế, nhưng Hà Nội (lúc này là Bắc Thành) vẫn duy trì vai trò là trung tâm hành chính - kinh tế quan trọng của miền Bắc. Giai đoạn này chứng kiến sự phát triển mạnh của mô hình "làng trong phố", trong đó các làng truyền thống được tích hợp vào không gian đô thị đang mở rộng. Các làng nghề như Yên Thái (làm giấy), Trích Sài (dệt lĩnh), Vạn Phúc (lụa) tiếp tục phát triển và kết nối trực tiếp với các phố nghề trong khu vực nội thành. Hệ thống sông như sông Tô Lịch và sông Nhuệ vẫn đóng vai trò là trục liên kết giữa các làng và khu phố, tạo nên một cấu trúc không gian vừa mang tính nông thôn vừa mang tính đô thị.

Đặc điểm nổi bật của giai đoạn này là sự tồn tại song song của hai hệ thống: (i) làng truyền thống với cấu trúc tự quản, và (ii) phố nghề với cấu trúc kinh tế đô thị, tạo nên một dạng hình thái tích hợp độc đáo. Không gian đô thị không bị quy hoạch theo dạng hình học cứng nhắc mà phát triển theo logic bản địa, với kiểu hình thái mềm dẻo, linh hoạt, bám theo đường làng, ngõ xóm và thủy hệ.

Hà Nội hình thành một cấu trúc "lai ghép" giữa nông thôn và thành thị, trong đó "làng" không bị xóa bỏ mà được tích hợp vào "phố". Như nhận định của nhiều nhà lịch sử, kinh tế, chính trị, văn hoá - xã hội: "*Đặc điểm đô thị hoá dưới thời phong kiến Á Đông, là sự hoà đồng của thành thị vào nông thôn*" [5].



Hình 4. Hà Nội thời vua Đồng Khánh (1886-1888) *Nguồn: Sách Đồng Khánh địa dư chí [7]*

2.4. Giai đoạn Pháp thuộc (1883-1954)

Giai đoạn Pháp thuộc đánh dấu một bước ngoặt quan trọng trong sự biến đổi hình thái đô thị Hà Nội, khi các nguyên tắc quy hoạch phương Tây được áp dụng một cách có hệ thống vào một đô thị truyền thống có gốc làng xã và thủy hệ. Các đồ án quy hoạch do người Pháp thực hiện, đặc biệt dưới thời Ernest Hébrard (1924-1932), đã tái cấu trúc không gian đô thị theo mô hình hiện đại, với các trục đường thẳng vuông góc, quảng trường và khu chức năng rõ ràng.

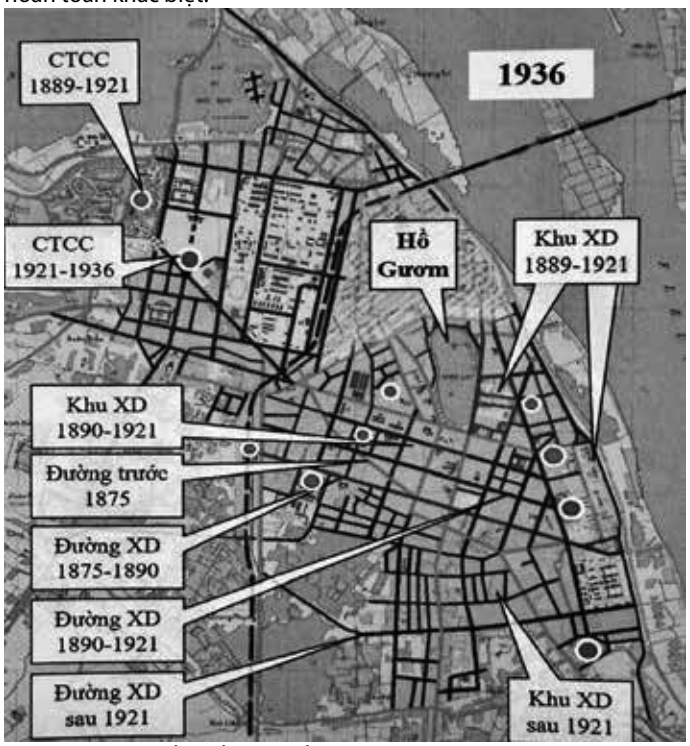
Hình 5. Quy hoạch Hà Nội 1925 của KTS. Ernest Hebrard. *Nguồn: [8]*

Theo đồ án, khu vực phía nam Hồ Gươm, bao gồm các trục như Tràng Tiền - Lý Thái Tổ - Hai Bà Trưng, được quy hoạch theo kiểu ô bàn cờ, tương tự các đô thị như Paris. Các công trình hành chính, biệt thự và công sở được bố trí theo nguyên tắc đối xứng, tạo nên một không gian đô thị có tính hình học và kiểm soát cao. Trong khi đó, khu phố cổ phía bắc Hồ Gươm vẫn giữ nguyên cấu trúc truyền thống với mạng lưới ngõ nhỏ và các phố nghề đan cài với nhau. Điều này dẫn đến sự hình thành một cấu trúc đô thị hai lớp rõ rệt:

(i) khu phố cổ - hình thái hữu cơ, cấu trúc bất quy tắc và

(ii) khu phố Pháp - hình thái quy hoạch kiểu ô cờ, cấu trúc đều đặn.

GS.TS.KTS Nguyễn Quốc Thông cho rằng: "*Về cấu trúc đô thị, ngoài việc sử dụng các yếu tố cảnh quan tự nhiên làm thành phần liên kết không gian, sự hài hòa của khu phố Pháp có được còn nhờ vào việc cho phép tồn tại một tỷ lệ nhất định những thành phần kiến trúc đô thị bản địa trong cấu trúc đô thị được thiết kế bài bản kiểu Pháp*". Ngày nay, tại một số con phố của Hà Nội như phố Bảo Khánh, phố Vũ Thạnh, xóm Hạ Hồi vẫn còn ghi lại dấu ấn của các hoạt động kinh tế xã hội truyền thống xưa, với mạng đường, ngõ có hình dạng tự nhiên cùng các ngôi đình, đền, chùa truyền thống [8]. Như vậy, Hà Nội hình thành cấu trúc "đô thị hai lớp", trong đó hai hệ thống hình thái tồn tại song song và hài hòa nhưng có tính chất và logic tổ chức hoàn toàn khác biệt.



Hình 6. Cấu trúc tổng thể khu phố cổ và khu phố cũ Hà Nội năm 1936 [15]

2.5. Giai đoạn hiện đại (1954-nay)

Sau năm 1954, Hà Nội bước vào giai đoạn phát triển theo mô hình quy hoạch xã hội chủ nghĩa, với các khu tập thể như Kim Liên, Trung Tự, Giảng Võ phản ánh ảnh hưởng từ mô hình Tiểu khu nhà ở của Liên Xô. Theo đó, hình thái đô thị bắt đầu chuyển từ dạng hữu cơ sang dạng khối - tuyến.

Các đồ án quy hoạch quan trọng như Quy hoạch Hà Nội 1955-1998, và đặc biệt là Quy hoạch chung 2011 (tầm nhìn 2030-2050) đã định hướng phát triển Hà Nội theo mô hình đa trung tâm, mở rộng không gian về phía tây (Hà Đông, Mỹ Đình) và phía bắc (Đông Anh). Việc mở rộng địa giới hành chính năm 2008 đã làm thay đổi mạnh mẽ cấu trúc không gian đô thị, khi Hà Nội sáp nhập toàn bộ tỉnh Hà Tây và một số khu vực lân cận.

Tuy nhiên, quá trình phát triển nhanh chóng này dẫn đến hiện tượng đứt gãy hình thái khi các khu đô thị mới như Ciputra, Linh Đàm, Mỹ Đình phát triển theo logic riêng, thiếu liên kết với cấu trúc đô thị truyền thống và hệ thống sông nước. Sông Tô Lịch và sông Nhuệ bị suy giảm vai trò trong cấu trúc không gian đô thị như trước đây. Hà Nội hiện đang phải đối mặt với sự phân mảnh và đứt gãy cấu trúc không gian, đòi hỏi phải tái tổ chức theo hướng tích hợp và bền vững hơn.

3. NHẬN DIỆN BẢN SẮC VÀ ĐỊNH HƯỚNG TÁI CẤU TRÚC KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ HÀ NỘI

3.1. Nhận diện bản sắc hình thái đô thị Hà Nội

Hình thái chồng xếp của các lớp không gian cũ - mới (morphological layering)

Bản sắc hình thái đô thị Hà Nội được hình thành qua quá trình tích lũy lịch sử lâu dài, thể hiện rõ tính chất đa lớp, trong đó có sự chồng xếp các lớp không gian khác nhau tương tác và cùng tồn tại. Từ hệ thống "kẻ" tiền đô thị dọc theo sông Hồng, sông Tô Lịch, đến cấu trúc Hoàng thành - phố phường Thăng Long, rồi đến lớp đô thị thuộc địa Pháp và các khu đô thị hiện đại mới, Hà Nội không phát triển theo một logic tuyến tính mà theo dạng ***hình thái chồng lớp (morphological layering).*** Một đặc trưng cốt lõi là mối quan hệ "Thị - Đô", vẫn còn thể hiện rõ trong khu vực phố cổ Hà Nội, nơi các tuyến phố như Hàng Đào, Hàng Bạc, Hàng Gai vừa là không gian cư trú vừa là không gian kinh tế, phản ánh mô hình "mixed-use" truyền thống.

Hình thái đan xen của Mặt nước và Cây xanh.

Cấu trúc "sông - hồ - rừng " trong đó Nước là yếu tố chính định hình không gian đặc thù. Hệ thống sông Hồng, sông Tô Lịch, sông Kim Ngưu kết hợp với các hồ như Hồ Tây, Hồ Hoàn Kiếm, Hồ Linh Đàm,… tạo nên mạng lưới thủy hệ vừa là yếu tố sinh thái vừa là khung tổ chức không gian đô thị, trong đó các hồ không chỉ là cảnh quan mà còn điều tiết nước và tạo vi khí hậu đô thị. Bên cạnh yếu tố Nước, hệ thống rừng là một yếu tố sinh thái quan trọng trong lòng Thăng Long - Hà Nội xưa.

Trong lịch sử, rừng bạt ngàn nối tiếp nhau từ rừng Báng (Từ Sơn) đến rừng Sặt (Trang Liệt), rừng tứ thiết (Xuân Quang), trong đó rừng bàng Yên Thái (Bưởi) là một trong "Tây Hồ bát cảnh" thời Lê. Rừng gắn liền với nước. Giữa bán đảo Hồ Tây có rừng gỗ tâm, viền một dải sông Tô vùng Cửa Bắc có rừng tre ngà. Một số di tích "rừng" như rừng nứa đền Voi Phục, còn tồn tại ở ngay nội thành Hà Nội (khu Ba Đình), rừng đa ở Gia Lâm, và một loạt các địa danh cổ khác như Du Lâm (rừng Dâu da), Mai Lâm (rừng Mơ, gồm cả Mai Động - Hoàng Mai - Bạch Mai - Hồng Mai - Tương Mai - Chợ Mơ). Rồi nào là Văn Lâm, Trường Lâm, Đông Ngàn... tất cả gắn với "rừng", với "ngàn", xanh tươi rậm rịt..." [4].

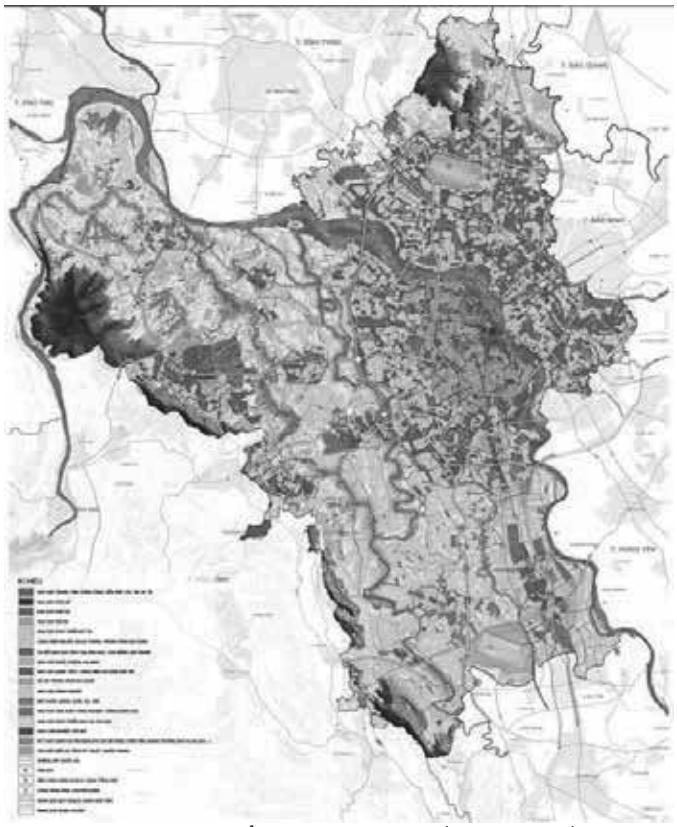
Hình thái chuyển tiếp giữa phố Tây- phố Ta; giữa làng- phố.

Giữa các khu phía bắc và khu phía Nam, giữa các khu phố cổ - phố cũ - phố Tây đều tồn tại những kiểu hình thái đặc trưng, đồng thời có sự tôn trọng nhất định trong tổ chức quy hoạch đô thị của người Pháp. Tuy nhiên, điều quan trọng là, mặc dù chúng có những nét riêng, nhưng nhờ sự kết nối khéo léo, vẫn tạo nên một cơ thể đô thị thống nhất.

Ngoài ra, Hà Nội mang đặc trưng "làng - phố", trong đó các làng truyền thống như Nghi Tàm, Quảng Bá, Bưởi, Láng được đô thị hóa nhưng vẫn giữ cấu trúc ngõ xóm, đình, chùa, tạo nên một dạng hình thái chuyển tiếp giữa nông thôn và đô thị. Đường làng gắn với ngõ phố.

Như vậy, bản sắc hình thái đô thị Hà Nội không phải là một hình thái đơn lẻ mà là một kiểu hình thái tích hợp đa lớp giữa Thị - Đô với sông, hồ - rừng và làng- phố để tạo nên một cấu trúc đô thị phức hợp và giàu tính bản địa.

Hình 7. Hồ Hoàn Kiếm năm 1930



Hình 8. Định hướng phát triển không gian TP Hà Nội đến năm 2045 và tầm nhìn 2065.
Nguồn: [11]

3.2. Các vấn đề trong cấu trúc hình thái hiện nay

Mặc dù sở hữu cấu trúc đa lớp đặc sắc, Hà Nội hiện nay đang đối mặt với nhiều vấn đề làm suy giảm tính liên kết hình thái. Trước hết là sự đứt gãy hệ thống thủy hệ, khi các sông như sông Tô Lịch, sông Kim Ngưu bị ô nhiễm nặng và mất vai trò như một trong các trục tổ hợp không gian đô thị. Nhiều hồ nội đô bị thu hẹp hoặc san lấp, làm suy giảm khả năng điều tiết nước và phá vỡ cấu trúc "sông - hồ" vốn là nền tảng hình thái ban đầu. Hai là cấu trúc không gian truyền thống, đặc biệt tại khu vực phố cổ và các làng đô thị hóa bị phá vỡ bởi xây dựng tự phát không kiểm soát làm biến dạng cấu trúc ngõ xóm, thu hẹp không gian công cộng và làm mất đi tính liên tục hình

thái. Ba là mô hình phát triển lan tỏa ra các khu vực như Hà Đông, Hoài Đức, Đông Anh, trong đó các khu đô thị mới như Linh Đàm, Mỹ Đình, Ciputra theo logic khép kín, thiếu kết nối với hệ thống đô thị hiện hữu dẫn đến sự phân mảnh không gian và thiếu liên kết giữa các khu vực. Cuối cùng, hệ thống giao thông chưa tương thích với cấu trúc hình thái, khi mạng lưới đường bộ quá tải, trong khi hệ thống vận tải công cộng khối lượng lớn (metro) lại chưa hoàn chỉnh. Các trục như Nguyễn Trãi, Giải Phóng, Phạm Văn Đồng phản ánh sự mất cân đối giữa phát triển không gian và hạ tầng, cũng như giữa hạ tầng và hình thái đô thị. Những khu ở thấp tầng, mật độ cao xen kẽ với các chung cư cao tầng không phù hợp với mô hình TOD hiện đại - vốn thích hợp với các khu đô thị mới hiện đại. Hà Nội đang chuyển từ cấu trúc tích hợp sang trạng thái phân mảnh hình thái, với sự suy yếu của các yếu tố nền tảng như mặt nước, không gian xanh, làng truyền thống và cấu trúc phố.

3.3. Định hướng tái cấu trúc không gian đô thị

Phát triển Hà Nội cần dựa trên nguyên tắc thuận theo các giá trị lịch sử - địa lý cấu thành bản sắc của hình thái đô thị. Trên cơ sở đó, cần tái cấu trúc hình thái một cách bền vững, thay vì phát triển mở rộng đơn thuần. Phát triển phải dựa trên nền tảng bảo tồn các hệ giá trị. Trước hết, cần bảo tồn lõi đô thị lịch sử, bao gồm khu vực Hoàng thành Thăng Long, phố cổ Hoàn Kiếm và khu phố Pháp, nhằm duy trì cấu trúc đa lớp và giá trị bản sắc. Thứ hai, bảo tồn bản sắc hình thái Hà Nội, từ tỷ xích đến tỷ lệ và hệ tỷ lệ không gian đô thị. Thứ ba, bảo tồn các yếu tố thiên nhiên cốt lõi, từ mặt nước đến không gian xanh của Hà Nội.

Phát triển đa lớp, đa cực, đa trung tâm cần dựa trên nguyên tắc hình thành các khu vực chức năng độc lập nhưng liên kết chặt chẽ với lõi trung tâm thông qua hệ thống giao thông công cộng. Phát triển đô thị theo mô hình TOD (Transit-Oriented Development) dọc theo các tuyến metro như tuyến số 2A (Cát Linh - Hà Đông), tuyến số 3 (Nhổn - ga Hà Nội), nhằm tái tổ chức mật độ dân cư và việc làm quanh các ga, qua đó giảm áp lực giao thông đường bộ và hình thành cấu trúc không gian nén.

Phục hồi và gìn giữ hệ thống sông - hồ, đặc biệt là các hồ nội đô như Hồ Tây, hồ Yên Sở, hồ Linh Đàm, không chỉ như không gian cảnh quan mà còn như hệ thống trữ nước và điều tiết ngập trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Đồng thời, cần cải tạo các sông như sông Tô Lịch thành hành lang sinh thái - không gian công cộng, liên kết với nhau thành một hệ thống. Phát triển hạ tầng xanh kết nối các công viên, hồ nước và hành lang xanh, tạo thành một mạng lưới liên hoàn, góp phần tái thiết cấu trúc không gian theo hướng bền vững. Hà Nội cần chuyển từ mô hình phát triển phân tán sang mô hình tích hợp - đa trung tâm - gắn với thủy hệ và giao thông công cộng tích hợp, nhằm khôi phục tính liên tục hình thái và nâng cao chất lượng không gian đô thị.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu khẳng định rằng cấu trúc hình thái đô thị Hà Nội được hình thành trên một nền tảng đặc thù, khác biệt với các mô hình đô thị phương Tây, với mạng lưới thương mại thủy hệ dọc theo sông Hồng, sông Tô Lịch, sông Kim Ngưu đã tạo nên nền tảng cấu trúc không gian đô thị ban đầu, trước khi quyền lực được thiết lập tại Thăng Long. Trải qua các giai đoạn lịch sử, Hà Nội không phát triển theo logic thay thế mà theo cơ chế tích lũy và chồng lớp hình thái, hình thành một cấu trúc đa lớp đặc trưng. Trong đó, các lớp không gian từ Hoàng thành, phố cổ, khu phố Pháp đến các khu đô thị hiện đại không tách rời mà đan xen, tương tác với nhau, cùng với hệ thống "sông - hồ - làng - phố" . Tất cả tạo nên một tổng thể không gian phức hợp. Đặc biệt, mô hình "làng trong phố và phố có làng" chính là biểu hiện điển hình của cấu trúc này, phản ánh sự dung hợp giữa yếu tố nông thôn và đô thị, giữa truyền thống và hiện đại trong cùng một chỉnh thể không gian.

Định hướng phát triển Hà Nội cần chuyển từ tư duy mở rộng sang tái cấu trúc hình thái đô thị, trong đó lấy nguyên tắc "*bảo tồn để phát triển, phát triển phải bảo tồn*" làm nền tảng. Việc giữ gìn lõi đô thị lịch sử, phục hồi hệ thống sông - hồ, rừng - hành lang xanh, tổ chức không gian theo mô hình đa trung tâm gắn với giao thông công cộng khối lượng lớn, đồng thời duy trì và phát huy cấu trúc *"làng trong phố, phố có làng"* sẽ là chìa khóa để đảm bảo sự phát triển bền vững và gìn giữ bản sắc đô thị Thăng Long - Hà Nội trong bối cảnh mới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nhiều tác giả. Đại Việt Sử ký Toàn Thư. NXB Thời Đại, 2013.

[2] Nguyễn Thúy Nga, Nguyễn Văn Nguyên. Địa chí Thăng Long - Hà Nội trong thư tịch Hán Nôm. NXB Thế giới, 2007.

[3] Doãn Minh Khôi. Hình thái học đô thị. NXB Xây dựng, 2019.

[4] Trần Quốc Vượng. Với Thăng Long Hà Nội. NXB Thế giới, 2011.

[5] Đàm Trung Phường. Đô thị Việt Nam, tập 1. NXB Xây dựng, 1995.

[6] Trung tâm Lưu trữ Quốc gia I. Hình ảnh, bản đồ Thăng Long - Hà Nội.

[7] Đồng Khánh địa dư chí. NXB Thế giới, 2003.

[8] Nguyễn Quốc Thông. Khu phố Pháp ở Hà Nội - Lịch sử một di sản đô thị. Tạp chí Kiến trúc Việt Nam, 2025.

[9] Lưu Đình Tuân (dịch). Việt Nam qua tuần san Indochine 1941-1944. NXB Thế giới, 2018.

[10] Vũ Ngọc Khánh. Tiếp cận kho tàng folklore Việt Nam. NXB Văn hóa Dân tộc, 1999.

[11] Tạp chí Kiến trúc Việt Nam. Hình ảnh, bản đồ Hà Nội.

[12] Kevin Lynch. The Image of the City. Cambridge, MA: MIT Press, 1960.

[13] M. R. G. Conzen. Alnwick, Northumberland: A Study in Town-Plan Analysis. London: Institute of British Geographers, 1960.

[14] Philippe Panerai, Jean Castex & Jean-Charles Depaule. Formes urbaines: de l'îlot à la barre. Marseille: Éditions Parenthèses, 1997.

[15] UBND TP Hà Nội. Kiến trúc Hà Nội 70 năm giải phóng Thủ đô (1954-2024), Phần 1. Trong: Vũ Hoài Đức. Kiến trúc Hà Nội - chặng đường 70 năm xây dựng và phát triển. NXB Xây dựng, 2024.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Bàn về xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam

Discussing the national modern trend in Vietnamese architecture

> **GS.TS.KTS NGUYỄN QUỐC THÔNG**
Hội Kiến trúc sư Việt Nam

TÓM TẮT

Đề cập đến kiến trúc hiện đại nói chung và xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam nói riêng là vấn đề không dễ. Bởi, do hoàn cảnh lịch sử, nền kiến trúc hiện đại Việt Nam bắt đầu muộn hơn và phát triển không liên tục so với nhiều nước khác trên thế giới. Từ 1986 đến nay, chính sách mở cửa, đổi mới nền kinh tế theo hướng thị trường đã tạo nên động lực thúc đẩy nhanh chóng sự phát triển kinh tế-xã hội của đất nước. Theo đó, kiến trúc hiện đại Việt Nam đang chứng kiến một giai đoạn phát triển bùng nổ với nhiều xu hướng và phong cách khác nhau. Trong đó xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc mang lại những thành công ban đầu đầy hứa hẹn trong việc định hình bản sắc kiến trúc hiện đại Việt Nam.

Tuy vậy, cho đến nay chưa có nhiều công trình nghiên cứu, tổng kết và đánh giá đầy đủ về xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam để có thể tham khảo. Trong bối cảnh ấy, bên cạnh việc kế thừa các công trình nghiên cứu đã công bố, bằng cách tiếp cận thực chứng thông qua các tác phẩm đoạt Giải thưởng Kiến trúc quốc gia kết hợp với việc khảo sát các công trình đã được xây dựng, bài viết tập trung làm rõ những thành công và hạn chế của xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc trong quá trình hình thành nền kiến trúc Việt Nam hiện đại và bản sắc.

Từ khóa: Xu hướng kiến trúc; phong cách kiến trúc; kiến trúc hiện đại; tính dân tộc; kiến trúc hiện đại dân tộc.

ABSTRACT

Discussing modern architecture in general and the national modern trend in Vietnamese architecture in particular is not an easy task. Due to historical circumstances, Vietnamese modern architecture began later and developed inconsistently compared to many other countries in the world. From 1986 to the present, the open-door policy and economic reforms towards a market economy have created a driving force for the rapid socio-economic development of the country. Accordingly, Vietnamese modern architecture is witnessing a period of explosive development with many different trends and styles. Among them, the national modern architectural trend has brought promising initial successes in shaping the identity of Vietnamese modern architecture.

However, to date, there are not many comprehensive studies, summaries, and evaluations of the national modern trend in Vietnamese architecture that can be used as a reference. In this context, besides inheriting published research, by adopting an empirical approach through works that have won the National Architecture Award combined with a survey of existing constructions, this article focuses on clarifying the successes and limitations of the modern national architectural trend in the process of forming a modern and distinctive Vietnamese architecture.

Keyword: Architectural trend; architectural style; modern architecture; national identity; modern national architecture.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Do hoàn cảnh lịch sử, nền kiến trúc hiện đại Việt Nam bắt đầu muộn hơn và phát triển không liên tục so với nhiều nước khác trên thế giới. Vì vậy bàn về kiến trúc hiện đại nói chung và xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam nói riêng là vấn đề khó nhưng cần thiết. Từ năm 1986 đến nay, chính sách mở cửa, đổi mới nền kinh tế theo hướng thị trường là động lực thúc đẩy nền kinh tế đất nước phát triển. Theo đó, kiến trúc hiện đại Việt Nam đang chứng kiến một giai đoạn phát triển bùng nổ chưa từng có trong lịch sử với nhiều xu hướng và phong cách khác nhau. Trong số các xu hướng, bài viết tập trung đánh giá xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc, bởi đây là xu hướng gắn với các yếu tố văn hóa bản địa và trên thực tế đã bước đầu đạt được những thành công đáng ghi nhận, có giá trị nhất định trong việc định hình bản sắc kiến trúc hiện đại Việt Nam.

Tuy nhiên, cho đến nay chưa có nhiều công trình nghiên cứu, tổng kết và đánh giá đầy đủ về xu hướng hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam. Trong bối cảnh ấy, cách tiếp cận trong bài viết là kế thừa các công trình nghiên cứu đã công bố, đánh giá các tác phẩm đoạt Giải thưởng Kiến trúc quốc gia kết hợp với việc khảo sát các công trình đã được xây dựng. Bài viết tập trung làm rõ những thành công và hạn chế của xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc với mong muốn góp thêm ý kiến trong sự nghiệp phát triển kiến trúc Việt Nam hiện đại và bản sắc.

2. XU HƯỚNG KIẾN TRÚC HIỆN ĐẠI DÂN TỘC

2.1. Nhận thức về kiến trúc hiện đại dân tộc

Nhận thức về kiến trúc hiện đại dân tộc có thể vẫn còn nhiều ý kiến khác nhau. Cần có sự tranh luận để thống nhất. Tuy nhiên, xét về bản chất, kiến trúc tự bao giờ vẫn vậy, có nhiệm vụ tạo không gian sống, không chỉ đáp ứng nhu cầu của con người mà còn phải đẹp và mang tính thời đại, đồng thời phản ánh tính dân tộc của cộng đồng và của quốc gia. Lịch sử kiến trúc cho biết, qua kiến trúc, có thể nhận ra thời đại mà kiến trúc hình thành và dân tộc sở hữu kiến trúc đó. Như vậy, có thể coi đó là tuyên ngôn kiến trúc của tất cả các quốc gia, dân tộc trên thế giới.

Trong suốt chiều dài lịch sử dân tộc, mặc dù từng trải qua nhiều giai đoạn chịu ảnh hưởng và áp đặt văn hóa từ các thế lực ngoại bang, đặc biệt là thời kỳ nghìn năm Bắc thuộc, kiến trúc Việt Nam vẫn giữ được bản sắc riêng, không bị đồng hóa hoàn toàn. Tính dân tộc vì vậy luôn được thể hiện rõ trong kiến trúc các triều đại, tạo nên giá trị đặc trưng của kiến trúc truyền thống Việt Nam, có sự khác biệt nhất định so với kiến trúc Trung Quốc và các quốc gia đồng văn như Nhật Bản, Hàn Quốc. Để minh họa, có thể xét đến hình thái mái trong kiến trúc truyền thống. Mái nhà Việt Nam thường có độ dốc lớn, với tỷ lệ mái so với thân nhà thường vượt quá hai lần, kết hợp với đường cong mềm mại ở đầu đao và sự vuốt cong nhẹ về hai phía, tạo nên hình ảnh kiến trúc vừa vững chắc vừa thanh thoát.

Trong khi đó, mái trong kiến trúc truyền thống Trung Quốc, Nhật Bản và Hàn Quốc thường mang dạng cong gãy khúc rõ rệt. Sự khác biệt này bắt nguồn từ hệ thống kết cấu vì kèo. Kiến trúc truyền thống Việt Nam chủ yếu sử dụng hệ vì kèo kẻ - bảy, không sử dụng hệ đấu củng như trong kiến trúc các nước đồng văn. Theo đó, mái dốc phẳng được hình thành trên cơ sở các cấu kiện chính nằm ngang (hoành), trong khi mái cong gãy khúc lại phụ thuộc vào hệ cấu kiện chính là rui chạy dọc từ bờ nóc xuống chân mái [6] (Hình 1-6).

Hình 1. Mái cong gãy khúc (Trung Quốc) và mái dốc phẳng (Việt Nam) [6]

Hình 2. Chùa Keo, Thái Bình [8]

Hình 3. Đầu đao chùa Keo, Thái Bình [8]

Hình 4. Chùa Bảo Sơn (thời Minh), Trung Quốc *(Nguồn: Internet)*

Hình 5. Điện Thái Hòa, Huế. *(Nguồn: Internet)*

Hình 6. Điện Thái Hòa, Tử Cấm Thành, Bắc Kinh, Trung Quốc. *(Nguồn: Internet)*

Ngày nay, có thể hiểu một cách khái quát, kiến trúc hiện đại dân tộc là loại hình kiến trúc có sự kết hợp giữa các yếu tố hiện đại và truyền thống trong kiến trúc đương đại, trong đó các giá trị truyền thống được đề cao. Trên cơ sở đó, trước khi đi sâu vào phân tích xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc trong kiến trúc Việt Nam, cần làm rõ một số khái niệm liên quan nhằm đảm bảo cơ sở lý luận cho việc nghiên cứu.

Trước hết là kiến trúc hiện đại. Kiến trúc hiện đại hình thành ở châu Âu vào cuối thế kỷ XIX - đầu thế kỷ XX, là xu hướng kiến trúc mới, tiêu biểu của thời đại công nghiệp, khước từ quy tắc kiến trúc cổ điển, phát triển dựa trên nguyên tắc hợp lý về công năng, kỹ thuật và vật liệu xây dựng mới. Xu hướng kiến trúc hiện đại phát triển mạnh và chưa dừng lại ở nhiều nước trên thế giới, nhất là từ sau chiến tranh thế giới lần thứ II, trong đó có Việt Nam.

Tiếp theo là yếu tố dân tộc. Yếu tố dân tộc, đặc biệt ở khía cạnh tinh thần, thường được xem là một trong những giá trị quan trọng trong đời sống văn hóa Việt Nam, góp phần tạo nên bản sắc và tính liên tục của dân tộc trong quá trình phát triển lịch sử.

Bên cạnh đó, yếu tố dân tộc trong kiến trúc không chỉ giới hạn ở khía cạnh tinh thần mà còn được hiểu theo nghĩa rộng, bao gồm toàn bộ các yếu tố liên quan đến kiến trúc như khả năng thích ứng với điều kiện môi trường, cảnh quan tự nhiên, đặc điểm văn hóa - xã hội của cộng đồng, cũng như bối cảnh phát triển kinh tế - xã hội của đất nước.

Cuối cùng, cần làm rõ hai khái niệm "xu hướng" và "phong cách" trong kiến trúc. Hai khái niệm này có thể được hiểu theo những cách khác nhau và việc phân biệt giữa chúng chỉ mang tính tương đối. Trong phạm vi bài viết, "xu hướng kiến trúc" được hiểu là một định hướng tư duy sáng tác mang tính khái quát, trong khi "phong cách kiến trúc" là sự biểu hiện cụ thể của tư duy sáng tác đó thông qua ngôn ngữ hình thức và dấu ấn cá nhân của kiến trúc sư. Một xu hướng có thể bao hàm nhiều phong cách khác nhau.

Trong quá trình phát triển kiến trúc ở nước ta xuất hiện nhiều xu hướng, trong đó có xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc. Xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc khởi đầu từ thời Pháp thuộc và phát triển đến ngày nay. Ngày nay, trong số các xu hướng và phong cách kiến trúc đang được định hình, xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc là xu hướng đạt được nhiều thành công với các phong cách kiến trúc cụ thể, để lại ấn tượng khá sâu sắc trong cảm nhận của cộng đồng về kiến trúc đương đại Việt Nam. Tuy nhiên, để hiểu rõ hơn về sự hình thành xu hướng kiến trúc này cần tìm hiểu hai cách tiếp cận mô phỏng và tiếp biến truyền thống trong kiến trúc. Mỗi cách tiếp cận đều có những thành công và hạn chế nhất định.

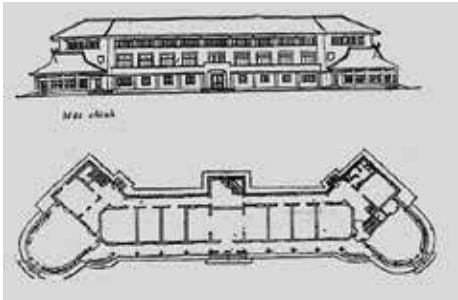
2.2. Xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc với cách tiếp cận mô phỏng truyền thống

Trước hết, có thể nhận định rằng kiến trúc hiện đại Việt Nam bắt đầu hình thành từ thời kỳ Pháp thuộc. Theo các tư liệu lịch sử, Victor Tardieu - hiệu trưởng Trường Mỹ thuật Đông Dương (thành lập năm 1925), trong đó có Khoa Kiến trúc (1926), được xem là người đặt nền móng cho quan niệm đề cao giá trị văn hóa bản địa (Đông Dương và Việt Nam) trong sáng tạo nghệ thuật hiện đại. Đây thực sự là điểm sáng tích cực trong nhận thức về kiến trúc hiện đại Việt Nam. Quan niệm này khơi dậy tinh thần dân tộc trong đào tạo và trong sáng tác kiến trúc của thế hệ kiến trúc sư đầu tiên được đào tạo thời Pháp thuộc.

Tuy nhiên, những sáng tạo theo hướng kết hợp hiện đại và dân tộc thời bấy giờ của các kiến trúc sư Pháp và Việt mới chủ yếu dựa trên việc khai thác giá trị hình thức của kiến trúc truyền thống Đông Dương trong kiến trúc hiện đại, nghĩa là đi theo cách tiếp cận mô phỏng kiến trúc truyền thống. Thời Pháp thuộc, thành công nổi bật và tiêu biểu nhất của xu hướng này là phong cách kiến trúc Đông Dương do KTS Ernest Hebrard sáng tạo.

Những năm đầu sau khi đất nước giành được độc lập, do điều kiện kinh tế còn nhiều khó khăn và nhu cầu xây dựng mới chưa lớn, vấn đề kế thừa yếu tố truyền thống trong kiến trúc chưa thực sự được đặt lên hàng đầu. Tuy nhiên, trong các công trình được xây dựng giai đoạn này, các KTS vẫn quan tâm đến yếu tố dân tộc, chủ yếu thông qua xu hướng mô phỏng hoặc kế thừa hình thức kiến trúc truyền thống (Hình 7-12).

Hình 7. Đại học Việt Nam - Kiến trúc Đông Dương, KTS E. Hebrard, 1925. *(Nguồn: Internet)*



Hình 8. Ủy ban hành chính tỉnh Nghĩa Lộ. KTS Nguyễn Cao Luyện - Kiến trúc hiện đại, bố cục cân xứng, khai thác nét đặc trưng kiến trúc truyền thống của dân tộc Thái Đen vùng Tây Bắc [7]

Hình 9. KTS Nguyễn Văn Ninh. Lễ đài Ba Đình (nay không còn) - Kiến trúc kết hợp dân tộc và hiện đại [7]

Hình 10. KTS Võ Đức Diên. Nhà Thủy tạ, Hà Nội - Kiến trúc kết hợp dân tộc và hiện đại [7]

Hình 11. Chùa Vĩnh Nghiêm - mô phỏng kiến trúc truyền thống, KTS Nguyễn Bá Lăng *(Nguồn: Internet)*

Hình 12. KTS Nguyễn Hữu Thiện. Nhà thờ Thị Nghè, TP.HCM [4]

Ngày nay, việc mô phỏng kiến trúc truyền thống vẫn là một hướng tiếp cận được nhiều KTS quan tâm, đặc biệt từ sau thời kỳ Đổi mới. Kết quả của các kỳ Giải thưởng Kiến trúc Quốc gia là một trong những cơ sở quan trọng cho thấy xu hướng này tiếp tục được duy trì và có ảnh hưởng nhất định trong sáng tác kiến trúc đương đại Việt Nam.

Theo hướng cách tân kiến trúc truyền thống, có phong cách Tân truyền thống. Đó là các công trình, như: Nghĩa trang liệt sĩ Điện Biên Phủ (KTS Nguyễn Trực Luyện, KTS Hoàng Phúc Thắng, 1994), Khu du lịch Sài Gòn Mũi Né, Bình Thuận (KTS Nguyễn Văn Tất, 2000), Khu Thái học, Di tích Văn Miếu Quốc Tử Giám, Hà Nội (KTS Lê Thành Vinh, 2000), Nhà ga T1, Sân bay quốc tế Nội Bài (KTS Lương Anh Dũng, Thân Hồng Linh, 2002), Khoa quốc tế, Bệnh viện Bạch Mai, Hà Nội (KTS Nguyễn Vũ Hưng, 2002). Sau này là các công trình: Làng Đất (KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Duy Thanh, 2016), Tái thiết Làng Nủ và làng Nậm Tông (KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Xuân Ngọc, Vũ Xuân Sơn, Nguyễn Duy Thanh, 2024),… (Hình 13-18)

Hình 13. Khu du lịch Sài Gòn Mũi Né, Bình Thuận. Giải nhất năm 2000, KTS Nguyễn Văn Tất [3].

Kiến trúc dân gian của làng quê Việt ở Nam Bộ được khai thác để trở thành "Một khu nghỉ biển với kiến trúc dung dị đầy chất thơ được tác giả chăm chút từ tổng thể đến từng chi tiết nhỏ nhất bằng gu thẩm mỹ tinh tế khiến lòng người nồng ấm lên. Những thân dừa vươn cao từ thế đất uốn lượn phủ cỏ xanh bồng bềnh bên rạch suối róc rách với những cây cầu đơn sơ - cảnh quan được con người tạo nên mà như trời sinh ra nơi bờ biển tràn cát của vùng đất Thuận Hải thừa nóng và gió".

Hình 14. Khu Thái học, Văn Miếu Quốc Tử Giám, Hà Nội. Giải nhì năm 2000, KTS Lê Thành Vinh [3].

Phỏng theo kiến trúc truyền thống, công trình được xây dựng trên vị trí của tòa Điện Khải Thánh xưa đã bị tàn phá năm 1946 khi toàn quốc kháng chiến. Mặc dù xuất hiện sau nhiều thế kỷ, Nhà Thái học thể hiện tinh hoa kiến trúc truyền thống của người Việt đã làm giàu thêm cho tổng thể kiến trúc và hoạt động của di tích nổi tiếng - Văn Miếu Quốc Tử Giám.

Hình 15. Nhà ga T1, Sân bay quốc tế Nội Bài. Giải nhất năm 2002, KTS Lương Anh Dũng, Thân Hồng Linh [3].

Là cửa ngõ đón tiếp bạn bè trong và ngoài nước, Nhà ga T1 tạo ấn tượng đầu tiên bằng hệ mái lớn mang dáng dấp kiến trúc truyền thống Việt Nam. Mái có độ vươn rộng, tạo bóng đổ sâu giúp hạn chế bức xạ nhiệt, phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới. Phần đầu hồi mái được kéo dài và vươn xa, tạo điểm nhấn kiến trúc mạnh mẽ và giàu bản sắc. Bên cạnh đó, cấu trúc không gian của công trình thể hiện sự kết hợp giữa tinh thần hiện đại và yếu tố truyền thống thông qua hệ mái - cột - dầm - con sơn mang đặc trưng kiến trúc Việt Nam.

Hình 16. Khoa quốc tế, Bệnh viện Bạch Mai, Hà Nội. Giải nhì năm 2002, KTS Nguyễn Vũ Hưng [3].

Sự dung dị của hình dáng ngôi nhà truyền thống Việt Nam với bộ mái khỏe, vươn rộng cùng với kiến trúc mặt nhà được khai thác tinh tế các chi tiết kiến trúc gỗ quen thuộc, làm nên hình ảnh công trình hiện đại mà lắng đọng chất truyền thống, toát lên vẻ tĩnh lặng ở bề ngoài tương đồng với yêu cầu bình tâm yên ả cho việc chữa trị.

Hình 17. Làng Đất. Giải vàng năm 2016, KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Duy Thanh [3]

Làng Đất là ngôi nhà cộng đồng của đồng bào Dao được thiết kế nhằm cải thiện bền vững chất lượng sống trên cơ sở giữ gìn và phát huy bản sắc văn hóa dân tộc. Vì thế, tường trình và vật liệu địa phương cùng các giải pháp thông gió, khai thác ánh sáng tự nhiên, tận dụng nguồn nước,… được vận dụng một cách sáng tạo, bên cạnh đó có sự tham gia trực tiếp của cộng đồng. Kiến trúc ngôi làng, vì thế hài hòa với cảnh quan tự nhiên và văn hóa của đồng bào dân tộc vùng Tây Bắc.

Hình 18. Tái thiết Làng Nủ và làng Nậm Tông. Giải vàng năm 2024, KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Xuân Ngọc, Vũ Xuân Sơn [3]

Lấy nhà cộng đồng, trường học và sân rộng làm trung tâm, các xóm nhỏ nhà ở được bố trí nương theo địa hình, tạo cảm giác tự nhiên, thân thuộc. Kiến trúc ngôi nhà với 4 mái xòe rộng là diện mạo mới hiện đại mang tính bản địa, gần gũi do khai thác sáng tạo các yếu tố truyền thống từ ngôi nhà sàn của người Tày Làng Nủ và nhà trệt của người Mông ở Nậm Tông. Bên cạnh đó, bằng giải pháp lắp ghép và sử dụng vật liệu hiện đại, ngôi làng đã được xây dựng trong thời gian ngắn kỷ lục, đáp ứng kịp thời nhu cầu an cư của người dân sau thảm họa thiên tai. Tái thiết Làng Nủ và làng Nậm Tông, vì thế mang ý nghĩa xã hội, nhân văn sâu sắc.

2.3. Xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc với cách tiếp cận tiếp biến truyền thống

Theo cách tiếp cận tiếp biến kiến trúc truyền thống, nổi bật là phong cách biểu hiện. Kiến trúc biểu hiện nhấn mạnh tính biểu tượng thông qua việc khai thác tinh thần của kiến trúc truyền thống. Đây là phong cách, ngay từ đầu đã có những thành công, phải chăng bởi sáng tạo thoát thai từ nền tảng văn hóa dân tộc sâu sắc trong tâm hồn của các KTS - tác giả. Các công trình tiêu biểu là: Hội trường Thống Nhất, TP.HCM (KTS Ngô Viết Thụ, 1962), Đài tưởng niệm Bắc Sơn, Đài tưởng niệm các Anh hùng liệt sĩ Tuyên Quang (Giải nhất năm 1996, KTS Lê Hiệp), Nghĩa trang liệt sĩ Ninh Thuận (Giải ba năm 1996, KTS Nguyễn Khởi), Đài tưởng niệm đôi bờ Hiền Lương, Bảo tàng Đắk Lắk (Giải nhì năm 2012, KTS Nguyễn Tiến Thuận), Cầu Vàng, TP Đà Nẵng (KTS Nguyễn Việt Anh), Bảo tàng Thế giới Cà phê, Buôn Ma Thuột (Studio A21), Nhà trăm mái (KTS Lữ Trúc Phương), Biệt thự Hằng Nga (KTS Đặng Việt Nga), Không gian thân thiện BE (Giải đồng năm 2016, các KTS Đoàn Thanh Hà, Trần Ngọc

Phương, Nguyễn Mạnh Hùng), Nhà ở Bắc Hồng (Giải vàng năm 2018, KTS Phạm Quốc Đạt), và The Park (Giải vàng năm 2024, KTS Nguyễn Hoàng Mạnh) (Hình 19-24).

Hình 19. Dinh Thống nhất, TP.HCM. KTS Ngô Viết Thụ, 1962 [5]

Hình 20. Hội trường lớn Trường Đại học Cần Thơ. KTS Huỳnh Kim Mãng, 1973 [5]

Hình 21. Đài tưởng niệm các Anh hùng liệt sĩ Tuyên Quang. Giải nhất năm 1996, KTS Lê Hiệp [3]

Vượt ra khỏi hình dáng thường gặp của thể loại đài tưởng niệm, tìm đến sự khái quát có tính tư tưởng nghệ thuật vừa hoành tráng vừa giàu chất thơ. Hình thức cách điệu của cây đa Tân Trào - đặc trưng cho vùng căn cứ cách mạng, gần gũi với tâm tưởng con người mà vẫn gợi được cảm xúc về sự rộng lớn, uy nghi.

Hình 22. Nghĩa trang liệt sĩ Ninh Thuận. Giải ba năm 1996, KTS Nguyễn Khởi [3]

Đạt tới sự hoành tráng bởi hình tượng và hình khối kiến trúc cô đọng ước lệ có phần thô cứng, nhưng lại hòa nhập vào khung cảnh của không gian linh dưới bầu trời chói chang của mảnh đất cực Nam Trung Bộ, đồng thời nói lên được lòng biết ơn vô hạn đối với những người đã nằm xuống vì dân tộc.

Hình 23. Bảo tàng Đăk Lăk. Giải nhì năm 2012, KTS Nguyễn Tiến Thuận [3]

Hình 24. Bảo tàng Thế giới Cà phê, Buôn Ma Thuột (A21 Studio, 2018) [3]

Ngoài ra còn có cách tiếp biến kiến trúc truyền thống theo hướng không chỉ thích ứng với môi trường tự nhiên, khí hậu để đảm bảo thông thoáng, mà còn thân thiện về văn hóa với các giải pháp kiến trúc mái rộng, hàng hiên, ô thoáng hoặc thanh che nắng và sử dụng hoa văn trang trí truyền thống. Đó là Kiến trúc hiện đại nhiệt đới.

Kiến trúc hiện đại nhiệt đới khởi đầu với phong cách Kiến trúc Đông Dương, thời Pháp thuộc. Kiến trúc hiện đại nhiệt đới được các thế hệ KTS tiếp tục phát triển với nhiều thành công, góp phần tích cực trong tạo dựng kiến trúc Việt Nam hiện đại và bản sắc. Ví dụ tiêu biểu: Thư viện tổng hợp, TP.HCM (KTS Nguyễn Hữu Thiện,1968), Trường Đại học Sư phạm, Huế, KTS Ngô Viết Thụ, Cung thiếu nhi, Hà Nội (KTS Lê Văn Lân, 1974), Trung tâm Hội nghị quốc tế, Hà Nội (KTS Nguyễn Thúc Hoàng, Đặng Kim Khôi, 1998), Trường Bình Dương (KTS Võ Trọng Nghĩa, 2012), Trường liên cấp hội nhập quốc tế Ischool Quảng Trị (các KTS Nguyễn Xuân Minh, Bùi Hưng Tĩnh, Nguyễn Văn Quý, Phùng Kim Phước, Lê Bá Huynh, Nguyễn Công Tuấn, 2018), Nhà thiếu nhi TP.HCM (KTS Nguyễn Trường Lưu, 2018),… (Hình 25-34)

Hình 25. KTS Ngô Viết Thụ. Trường Đại học Sư phạm, Huế, [5]

Hình 26. KTS Nguyễn Hữu Thiện. Thư viện tổng hợp, TP.HCM, 1968 [5]

Hình 27. KTS Nguyễn Quang Nhạc. Ngân hàng Thương tín Sài gòn [5]

Hình 28. Trung tâm Hội nghị quốc tế. Giải nhì năm 1998. KTS Nguyễn Thúc Hoàng, KTS Đặng Kim Khôi, 1997 [5]

Hình 29. Cung thiếu nhi, TP Hà Nội. KTS Lê Văn Lân, 1974 [5]

Hình 30. Trường liên cấp hội nhập quốc tế Ischool Quảng Trị. Giải bạc năm 2018, các KTS Nguyễn Xuân Minh, Bùi Hưng Tĩnh, Nguyễn Văn Quý, Phùng Kim Phước, Lê Bá Huynh, Nguyễn Công Tuấn [3]

Tổng mặt bằng được bố cục và phân khu chức năng rõ ràng, khúc chiết với lõi xanh ở giữa tạo nên một ngôi trường xanh đúng nghĩa. Khối học mầm non vuông vức với cấu trúc 2 mái, mái trên được tách rời và hệ cột thanh mảnh tạo không gian sinh động, thông thoáng, có sân trong rộng kết nối với các khối học phổ thông. Các khối chức năng là không gian mở với những khoảng trống tầng xen kẽ được kết nối bằng hành lang chạy suốt. Mặt đứng là tường 2 lớp gạch hoa trang trí - một dạng tường thở, làm nổi bật hình thức kiến trúc của ngôi trường.

Hình 31. Nhà thiếu nhi TP.HCM. Giải bạc năm 2018, KTS Nguyễn Trường Lưu [3]

Ý tưởng tạo hình gây ấn tượng theo xu hướng kiến trúc xanh. Các nan che nắng được tạo hình khéo léo và tự nhiên, kết hợp hài hòa với cây xanh trên các tầng, tạo nên một tổng thể công trình khá bắt mắt và thân thiện, phù hợp với con mắt của thiếu nhi.

Hình 32. Trường Bình Dương. Giải khuyến khích năm 2012, KTS Võ Trọng Nghĩa [3]

Hình 33. The Park. Giải vàng 2024, KTS Nguyễn Hoàng Mạnh [3]

Công trình The Park nằm trong tổ hợp Ecopark Vinh là một Club House nổi bật với nỗ lực kết hợp giữa tính nhân tạo và tự nhiên. Nhìn từ hồ, công trình gợi nhớ đến kiến trúc gỗ truyền thống. Từ góc nhìn đối diện, lại thấy các lớp mái xanh hòa vào cảnh quan thiên nhiên xung quanh. Sự kết hợp kép này thể hiện cách giải quyết hài hòa mối liên hệ giữa yếu tố nhân tạo và tự nhiên, đồng thời mang lại cho công trình giá trị tạo hình độc đáo, riêng có.

Hình 34. Nhà ở Bắc Hồng. Giải vàng năm 2018, KTS Phạm Quốc Đạt [3]

Trong cơn lốc đô thị hóa nông thôn, Nhà ở Bắc Hồng là giải pháp tổ chức không gian ở tại nông thôn theo nếp sống mới, nhưng biết giữ gìn mạch văn hóa truyền thống, kết nối ba thế hệ trong một gia đình với triết lý "Xa mà Gần". Các khối nhà được bố cục xô lệch nhưng hài hòa, đẹp mắt, liên kết với nhau bằng sân giữa và hàng hiên rộng, đồng thời sử dụng kết hợp nhuần nhuyễn các vật liệu quen thuộc như gạch trần, ngói đỏ, gỗ, sắt,… Các phòng cho từng

thế hệ được bố trí hợp lý, vừa đảm bảo tính riêng tư, vừa tạo ra sự gần gũi, sum họp cho các thành viên trong gia đình qua sân vườn chung, hành lang, sân trời và mặt nước.

Những năm gần đây, yếu tố bản địa và xanh được các KTS quan tâm. Theo cách tiếp cận này, bản sắc địa phương trong kiến trúc được cảm nhận rõ hơn. Đó là phong cách kiến trúc bản địa mới mang đậm tính chất địa phương. Nghĩa là, công trình phù hợp với nơi chốn, hướng đến sự tiếp nối và bổ sung truyền thống trong thời đại mới. Những công trình tiêu biểu là: Café Gió và Nước (KTS Võ Trọng Nghĩa, Nguyễn Hòa Hiệp, Sakata Minoru, Ohara, 2006); Nhà cộng đồng thôn Suối Rè, Lương Sơn, Hòa Bình (KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Duy Thanh, 2010); Công trình cải tạo chợ Đồng Xuân (KTS Lê Văn Lân), Sơn La Restaurant (KTS Võ Trọng Nghĩa, Vũ Văn Hải, Ngô Thùy Dương, Trần Mai Phương, 2014). (Hình 35,36)

Hình 35. Nhà cộng đồng thôn Suối Rè, Lương Sơn, Hòa Bình. Giải ba năm 2010, KTS Hoàng Thúc Hào, Nguyễn Duy Thanh [3]

Hình 36. Sơn La Restaurant. Giải vàng năm 2014, KTS Võ Trọng Nghĩa, Vũ Văn Hải, Ngô Thùy Dương, Trần Mai Phương [3]

KTS đã khéo sử dụng vật liệu địa phương quen thuộc là đá và tre. Những bức tường vuông vức có bề mặt thô mộc tạo nên hình khối vững chắc, mạnh mẽ, hài hò với khung cảnh miền núi. Không gian được thiết kế từ đóng sang mở, từ riêng sang chung liên thông qua giếng trời với cấu trúc tre nhẹ nhàng và cách bài trí nội thất tối giản vừa dân giã vừa hiện đại.

3. NHẬN XÉT

Kiến trúc hiện đại xuất hiện ở nước ta muộn hơn so với các nước phát triển, nhưng trong quá trình phát triển, nhất là từ sau Đổi mới, kiến trúc có cơ hội phát triển mạnh với sự đa dạng về xu hướng và phong cách kiến trúc. Mỗi xu hướng đều có những thành công và hạn chế nhất định. Trong đó, kiến trúc hiện đại dân tộc là xu hướng xuyên suốt quá trình phát triển kiến trúc, góp phần quan trọng trong việc định hình bản sắc của kiến trúc Việt Nam đương đại.

Để đánh giá khách quan xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc, bài viết dựa vào các công trình nghiên cứu đã công bố, vào các tác phẩm đoạt Giải thưởng Kiến trúc quốc gia kết hợp với khảo sát thực tế các công trình đã được xây dựng. Trong đó, Giải thưởng Kiến trúc quốc gia là nơi tôn vinh các tác giả - tác phẩm kiến trúc xuất sắc, thúc đẩy sáng tạo kiến trúc cũng như nâng cao nhận thức xã hội về kiến trúc, qua đó góp phần định hướng phát triển kiến trúc nước nhà.

Về phía tác giả - KTS, nhu cầu khẳng định dấu ấn cá nhân cùng với cảm hứng sáng tạo từ văn hóa và kiến trúc truyền thống đã thúc đẩy nhiều KTS tìm kiếm các hướng tiếp cận mang bản sắc riêng. Theo xu hướng kiến trúc hiện đại dân tộc, nhiều phong cách kiến trúc dựa trên tư duy tiếp biến truyền thống đã đạt được những thành công đáng ghi nhận và cần tiếp tục được phát huy, như: kiến trúc nhiệt đới, kiến trúc biểu hiện, kiến trúc bản địa và kiến trúc xanh. Tuy nhiên, bên cạnh những kết quả tích cực, vẫn tồn tại một số hạn chế như xu hướng mô phỏng kiến trúc truyền thống theo lối nệ cổ, sao chép hình thức kiến trúc cổ điển phương Tây hoặc quá chú trọng yếu tố hình thức mà thiếu chiều sâu về công năng và bản sắc văn hóa. Đây là những biểu hiện cần được xem xét và khắc phục trong quá trình phát triển kiến trúc hiện đại Việt Nam.

Trong bối cảnh đó, nhiều kiến trúc sư, đặc biệt là thế hệ kiến trúc sư trẻ, thông qua các tác phẩm, đạo đức nghề nghiệp và trách nhiệm xã hội của mình, đã từng bước khẳng định vị thế trong giới chuyên môn. Những đóng góp này không chỉ góp phần xây dựng nền kiến trúc Việt Nam hiện đại và giàu bản sắc, mà còn tạo điều kiện để kiến trúc Việt Nam hội nhập hiệu quả với kiến trúc thế giới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Tôn Thất Đại. Những vấn đề về kiến trúc đương đại Việt Nam. NXB. Xây dựng, 2020.

[2]. Đặng Thái Hoàng. Tủ sách lý luận kiến trúc. Tập I, II, III, IV, V, VI, VII. NXB Mỹ thuật, 2016.

[3]. Hội KTSVN. Giải thưởng Kiến trúc quốc gia 1994, 2000, 2002, 2006, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2024.

[4]. Hội KTSVN. Hướng tới 50 năm kiến trúc Việt Nam - 50 năm Đất nước thống nhất. NXB Xây dựng, 2025.

[5]. Hội KTSVN. Lý luận và phê bình kiến trúc ở Việt Nam. NXB Thanh Niên, 2018.

[6]. Nguyễn Hồng Kiên. Góc đao cong. Kỳ quan biểu tượng của kiến trúc gỗ cổ truyền Việt. Số 1+2/2026 và số 3/2026. Tạp chí Thế giới di sản.

[7]. Nguyễn Quốc Thông. Những người tiên phong trong kiến trúc hiện đại Việt Nam. Tham luận Hội thảo khoa học tại Viện Kiến trúc quốc gia ngày 13/1/2017

[8]. Trung tâm Bảo tồn Di sản Thăng Long - Hà Nội (2026). Tư liệu khảo sát di tích kiến trúc Việt Nam. Nguyễn Quốc Thông thực hiện.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Mô hình và giải pháp quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch tỉnh Quảng Ninh dưới góc độ quản lý đô thị

Models and solutions for the management of architectural heritage at tourist sites in Quang Ninh province from an urban management perspective

> THS.KTS LƯƠNG VŨ ĐÀM NINH[1], TS.KTS NGÔ THỊ KIM DUNG[2]
[1]Viện Quy hoạch Đô thị và Nông thôn quốc gia, Bộ Xây dựng
[2]Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

TÓM TẮT

Quảng Ninh có hệ thống di sản kiến trúc phong phú, phân bố tại nhiều điểm du lịch với loại hình, quy mô và cường độ khai thác khác nhau. Trong bối cảnh du lịch tăng trưởng nhanh và đô thị hóa mạnh, quản lý di sản kiến trúc đặt ra yêu cầu hài hòa giữa bảo tồn, khai thác và kiểm soát không gian. Nghiên cứu sử dụng phương pháp định tính, kết hợp tổng hợp tài liệu, khảo sát 47 điểm du lịch có di sản kiến trúc, phỏng vấn các nhóm chủ thể liên quan và tham vấn chuyên gia. Dữ liệu được phân tích theo bốn tiêu chí: tính chất di sản, hoạt động du lịch, không gian - cảnh quan và cấu trúc quản trị. Kết quả nghiên cứu phân loại 47 điểm khảo sát thành 5 nhóm, đề xuất 5 mô hình quản lý tương ứng và các nhóm giải pháp về thể chế, không gian, tổ chức bộ máy, cộng đồng, tài chính và chuyển đổi số.

Từ khóa: Di sản kiến trúc; quản lý di sản; điểm du lịch; quản lý đô thị; Quảng Ninh.

ABSTRACT

Quang Ninh possesses a rich system of architectural heritage distributed across various tourist sites with different typologies, spatial scales, and levels of use. In the context of rapid tourism growth and urbanization, architectural heritage management requires a balance among conservation, utilization, and spatial control. This study adopts a qualitative approach, combining document review, field surveys of 47 tourist sites with architectural heritage, interviews with relevant stakeholder groups, and expert consultations. The data were analyzed according to four criteria: heritage characteristics, tourism activities, spatial-landscape conditions, and governance structure. The findings classify the 47 surveyed sites into five groups, propose five corresponding management models, and identify key solutions related to institutional frameworks, spatial management, organizational structure, community participation, financing, and digital transformation.

Keywords. Architectural heritage; heritage management; tourist sites; urban management; Quang Ninh.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quảng Ninh là một trong những trung tâm du lịch lớn của Việt Nam, đồng thời sở hữu hệ thống di sản văn hóa và di sản kiến trúc đa dạng, phân bố từ đô thị ven biển, trung du, miền núi biên giới đến không gian biển đảo. Toàn tỉnh hiện có 636 di tích, cụm di tích lịch sử - văn hóa và danh lam thắng cảnh, gồm 8 di tích quốc gia đặc biệt, 56 di tích cấp quốc gia, 101 di tích cấp tỉnh và 471 di tích đã được kiểm kê; cùng với đó là 88 điểm du lịch đã được công nhận. Năm 2025, Quảng Ninh đón 21,28 triệu lượt khách, tổng thu du lịch đạt khoảng 57.000 tỷ đồng; hai tháng đầu năm 2026 tiếp tục đón 4,1 triệu lượt khách và đạt doanh thu 10.375 tỷ đồng [6], [12], [13]. Quy mô di sản lớn, mật độ điểm đến cao và áp lực khai thác gia tăng đặt ra yêu cầu đổi mới phương thức quản lý, nhất là tại các điểm du lịch có cường độ sử dụng không gian cao.

Trong nhiều năm qua, công tác bảo tồn di sản tại Quảng Ninh đã đạt được những kết quả tích cực, đặc biệt ở các di tích quốc gia đặc biệt và một số cụm di sản nổi bật. Tuy nhiên, kết quả khảo sát cho thấy chất lượng quản lý giữa các điểm đến phân hóa khá mạnh. Một số điểm có ban quản lý chuyên trách, cơ chế phối hợp và khả năng tái đầu tư từ du lịch; trong khi nhiều điểm khác vẫn vận hành theo cơ chế kiêm nhiệm, thiếu quy chế riêng, thiếu công cụ kiểm soát không gian - cảnh quan và thiếu dữ liệu số phục vụ giám sát.

Trên phương diện lý luận, các nghiên cứu trong và ngoài nước đã cung cấp nhiều cách tiếp cận về quản lý di sản, quản trị cộng đồng, kinh tế di sản và bảo tồn đô thị lịch sử. Tuy nhiên, đối với Quảng Ninh, cách tiếp cận tích hợp quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch dưới góc độ quản lý đô thị vẫn chưa được phát triển thành một khung phân tích đủ rõ để kết nối đồng thời loại hình di sản, cấu trúc không gian, cường độ du lịch, mô hình quản lý hiện hữu và điều kiện thực thi ở địa phương.

Điều này dẫn đến việc lựa chọn mô hình quản lý phù hợp cho từng nhóm điểm đến vẫn còn mang tính kinh nghiệm.

Từ yêu cầu thực tiễn đó, nghiên cứu tập trung trả lời ba câu hỏi: (1) Thực trạng quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch Quảng Ninh hiện nay bộc lộ những đặc trưng và vấn đề gì; (2) Các điểm du lịch có di sản kiến trúc có thể được phân nhóm theo những tiêu chí quản lý nào; và (3) Mỗi nhóm điểm du lịch phù hợp với mô hình quản lý nào để vừa bảo tồn giá trị di sản, vừa đáp ứng yêu cầu phát triển du lịch và quản lý không gian?

Trong nghiên cứu này, góc nhìn quản lý đô thị được hiểu là cách tiếp cận quản lý di sản kiến trúc như một hợp phần của không gian điểm đến, chịu tác động đồng thời của quy hoạch, xây dựng, hạ tầng kỹ thuật, cảnh quan, dịch vụ du lịch, dòng khách và cơ chế quản trị địa phương. Vì vậy, hiệu quả quản lý không chỉ được đánh giá ở khả năng bảo vệ yếu tố gốc của di sản, mà còn ở năng lực kiểm soát vùng đệm, tổ chức không gian xung quanh và điều phối các chủ thể tham gia quản lý.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở khoa học

Nghiên cứu được xây dựng trên ba nền tảng chính. Thứ nhất là cơ sở pháp lý, gồm các quy định của pháp luật về di sản văn hóa, du lịch, quy hoạch, xây dựng và các quyết định quản lý của tỉnh Quảng Ninh liên quan đến bảo tồn, phát huy giá trị di tích và phát triển du lịch [2], [3], [4], [10]. Các quy định về phân cấp quản lý, thẩm quyền tu bổ, bảo vệ khu vực di tích, tổ chức hoạt động du lịch và phối hợp liên ngành là căn cứ xác định các hợp phần thể chế của khung phân tích.

Thứ hai là cơ sở lý luận. Nghiên cứu kế thừa các quan điểm xem di sản như một nguồn lực văn hóa - kinh tế và là không gian tương tác giữa bảo tồn, phát triển và sự tham gia cộng đồng [1], [5], [8], [14]. Theo đó, di sản kiến trúc không phải là một đối tượng tách biệt để quản lý đơn ngành, mà phải được đặt trong quan hệ với điểm đến du lịch, cảnh quan văn hóa, vùng đệm, dịch vụ, hạ tầng và các chủ thể vận hành thực tế. Các nghiên cứu về du lịch di sản nhấn mạnh yêu cầu tích hợp bảo tồn với quản lý điểm đến và phát triển bền vững [9]; trong khi các nghiên cứu về quản trị di sản chỉ ra rằng hiệu quả bảo tồn phụ thuộc lớn vào cơ chế phối hợp giữa nhà nước, cộng đồng và doanh nghiệp [1], [7]. Đây là cơ sở để nghiên cứu tiếp cận vấn đề theo hướng quản lý đa chủ thể gắn với không gian.

Hình 1. Khung phân tích quản lý di sản kiến trúc tại điểm du lịch dưới góc độ quản lý đô thị *(Nguồn: Tác giả tổng hợp)*

Thứ ba là cơ sở thực tiễn của tỉnh Quảng Ninh. Việc thành lập Ban Quản lý Di sản thế giới Vịnh Hạ Long - Yên Tử năm 2025 cho thấy xu hướng tích hợp quản lý đối với các cụm di sản quy mô lớn và có giá trị nổi bật [11]. Ngược lại, số lượng lớn di tích cấp tỉnh và di tích đã kiểm kê vẫn chủ yếu do UBND cấp cơ sở hoặc các ban quản lý kiêm nhiệm trực tiếp trông coi. Trên cơ sở ba nền tảng trên, nghiên cứu xây dựng khung phân tích quản lý di sản kiến trúc tại điểm du lịch dưới góc độ quản lý đô thị gồm sáu thành phần: thể chế và phân cấp; không gian và cảnh quan; tổ chức bộ máy; cộng đồng và các chủ thể liên quan; nguồn lực tài chính; và dữ liệu số, giám sát, truyền thông (Hình 1).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp định tính, kết hợp phân tích mô tả, đối chiếu so sánh và tham vấn chuyên gia. Khảo sát thực địa được thực hiện tại 47 điểm du lịch có di sản kiến trúc trên địa bàn tỉnh Quảng Ninh trong giai đoạn 2023-2025. Việc lựa chọn điểm khảo sát dựa trên ba điều kiện: Đã hoặc đang được khai thác du lịch; có thành phần di sản kiến trúc hoặc quần thể kiến trúc mang giá trị văn hóa - lịch sử; và có chủ thể quản lý hoặc trông coi tương đối xác định. Mỗi điểm khảo sát được ghi nhận theo các thông tin chính: tên điểm, địa bàn phân bố, loại hình di sản kiến trúc, tài nguyên du lịch liên quan, nội dung khai thác du lịch, phạm vi không gian sử dụng và mô hình quản lý hiện hành. Bên cạnh khảo sát thực địa, nghiên cứu thực hiện nhiều cuộc phỏng vấn với 8 nhóm đối tượng gồm chuyên gia, cán bộ quản lý, doanh nghiệp, người dân địa phương, đại diện tổ chức tôn giáo và chủ thể trực tiếp trông coi di tích; đồng thời tham vấn sâu các chuyên gia để rà soát khung phân tích, logic phân nhóm và tính phù hợp của các mô hình đề xuất.

Dữ liệu được mã hóa theo bốn nhóm tiêu chí: tính chất di sản kiến trúc; đặc điểm hoạt động du lịch; điều kiện không gian - cảnh quan; và cấu trúc quản trị thực tế. Trong trường hợp có giao thoa, tiêu chí về cấu trúc quản trị và áp lực sử dụng không gian được dùng làm căn cứ ưu tiên để quyết định nhóm chính.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Thực trạng quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch Quảng Ninh

Kết quả khảo sát tại 47 điểm du lịch cho thấy hệ thống quản lý di sản kiến trúc ở Quảng Ninh đã hình thành tương đối đầy đủ từ cấp tỉnh đến cấp cơ sở, bảo đảm phần lớn di tích đều có chủ thể trực tiếp quản lý. Cơ cấu mô hình quản lý hiện trạng khá đa dạng: 2 điểm có ban quản lý chuyên trách cấp tỉnh; 17 điểm có ban quản lý chuyên trách trực thuộc UBND cấp xã cho từng điểm cụ thể; 15 điểm do ban quản lý cấp xã quản lý chung toàn bộ di tích trên địa bàn; 4 điểm do UBND cấp xã trực tiếp quản lý; 3 điểm được giao cho chủ thể sử dụng trực tiếp quản lý; 3 điểm vận hành theo mô hình đặc thù; và 3 điểm thực hiện theo cơ chế đồng quản lý. Cơ cấu này cho thấy quản lý nhà nước vẫn giữ vai trò trụ cột, nhưng thực tiễn vận hành tại điểm đến đã bắt đầu dịch chuyển theo hướng đa chủ thể.

Dữ liệu khảo sát đồng thời cho thấy chất lượng quản lý phân hóa rõ rệt giữa nhóm di sản trọng điểm và phần còn lại của hệ thống. Các cụm di sản có giá trị nổi bật như Yên Tử, Bạch Đằng, Nhà Trần Đông Triều hay Thương cảng Vân Đồn thường có cơ chế tổ chức rõ hơn, nguồn lực đầu tư lớn hơn và khả năng gắn bảo tồn với khai thác du lịch tốt hơn. Ngược lại, nhiều điểm quy mô nhỏ hoặc phân tán vẫn chủ yếu dựa vào cơ chế quản lý kiêm nhiệm, nên năng lực kiểm soát can thiệp xây dựng, tổ chức dịch vụ, theo dõi hiện trạng và cập nhật hồ sơ còn hạn chế.

Kết quả phỏng vấn cho thấy xung đột phổ biến tại các điểm du lịch di sản hiện nay chủ yếu xuất phát từ sự không tương thích giữa mục tiêu phát triển ngắn hạn và yêu cầu bảo tồn dài hạn. Áp lực mở rộng dịch vụ, gia tăng sức chứa, tổ chức lễ hội, bổ sung hạ tầng và điều chỉnh mặt bằng kinh doanh thường diễn ra nhanh hơn năng lực kiểm soát của cơ quan quản lý. Vì vậy, vấn đề không chỉ nằm ở công trình di tích, mà nằm ở toàn bộ không gian tiếp cận, vùng đệm và các hoạt động hỗ trợ xung quanh di sản.

Vai trò thực tế của các chủ thể ngoài nhà nước đã gia tăng rõ nhưng địa vị pháp lý và trách nhiệm chưa được xác lập tương xứng. Tại nhiều điểm tâm linh, cơ sở tôn giáo hoặc người trực tiếp trông coi giữ vai trò trung tâm trong vận hành nghi lễ, tiếp nhận công đức, hướng dẫn du khách và bảo vệ thường nhật. Tại các điểm du lịch cộng đồng, người dân tham gia khai thác dịch vụ,

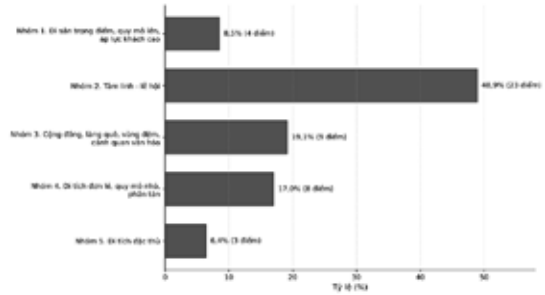
diễn giải di sản và duy trì cảnh quan sống. Ở một số điểm đặc thù, doanh nghiệp hoặc đơn vị chuyên biệt lại nắm lợi thế về nguồn lực, nhưng quan hệ với cơ quan quản lý nhà nước vẫn thiếu các quy chế phối hợp rõ ràng.

Cấp cơ sở là nơi chịu áp lực trực tiếp lớn nhất nhưng nguồn lực lại mỏng, kiêm nhiệm và thiếu kỹ năng liên ngành. Nhiều cán bộ quản lý chưa được trang bị đầy đủ về bảo tồn kiến trúc, quản lý vùng đệm, kiểm soát xây dựng, điều tiết dòng khách hay vận hành dữ liệu số. Do đó, quản lý ở nhiều nơi mới dừng ở trông coi hiện trạng và xử lý tình huống, chưa chuyển được sang quản lý chủ động dựa trên quy chế, dữ liệu và công cụ giám sát.

Nhìn từ khung lý luận đã nêu, quản lý di sản kiến trúc ở Quảng Ninh đang chuyển từ mô hình quản lý hành chính thuần túy sang quản trị có sự tham gia của nhiều chủ thể. Tuy nhiên, một đặc điểm riêng của tỉnh là sự đa dạng rất lớn giữa các loại điểm đến làm cho một mô hình quản lý chung khó phát huy hiệu quả. Vì vậy, trọng tâm của nghiên cứu là xây dựng logic phân nhóm để gắn từng dạng điểm đến với một cơ chế quản lý phù hợp.

3.2. Phân nhóm điểm du lịch có di sản kiến trúc

Từ các kết quả trên, nghiên cứu cho rằng không thể áp dụng một mô hình quản lý đồng nhất cho toàn bộ các điểm du lịch có di sản kiến trúc trên địa bàn tỉnh. Sự khác biệt về loại hình di sản, quy mô không gian, cường độ du lịch, quan hệ với cộng đồng cư dân và cấu trúc chủ thể vận hành đòi hỏi phải lựa chọn mô hình theo nhóm điểm đến.



Hình 2. Cơ cấu phân nhóm 47 điểm khảo sát theo đặc điểm không gian và quản lý
(Nguồn: Tác giả tổng hợp)

Bảng 1. Phân nhóm các điểm du lịch có di sản kiến trúc và mô hình quản lý đề xuất tại 47 điểm du lịch di sản tỉnh Quảng Ninh.

Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp

Nhóm điểm du lịch	Đặc điểm nhận diện chính	Mô hình quản lý đề xuất
Nhóm 1. Di sản trọng điểm	Quy mô lớn, giá trị nổi bật, không gian rộng, nhiều thành phần, áp lực khách cao, nhiều chủ thể tham gia	Phối hợp đa bên
Nhóm 2. Tâm linh - lễ hội	Hoạt động tín ngưỡng, hành hương và lễ hội thường xuyên; cường độ sử dụng không gian lớn theo mùa vụ; vai trò cơ sở tôn giáo rõ nét	Đồng quản lý nhà nước - cơ sở tôn giáo
Nhóm 3. Cộng đồng, làng quê, vùng đệm di sản và cảnh quan văn hóa	Di sản gắn với đời sống cư dân, sinh kế, nghề truyền thống và cấu trúc cảnh quan văn hóa	Quản lý dựa vào cộng đồng
Nhóm 4. Di tích đơn lẻ, quy mô nhỏ, phân tán	Nguồn lực hạn chế, phân tán, khó tổ chức bộ máy riêng, thường quản lý kiêm nhiệm	Quản lý kiêm nhiệm có chuẩn hóa
Nhóm 5. Di tích đặc thù	Gắn với ngành than, biên phòng, doanh nghiệp hoặc đơn vị chuyên biệt; có nguồn lực nhưng cần bổ sung chuyên môn di sản	Phối hợp đặc thù giữa chủ thể quản lý trực tiếp với cơ quan quản lý nhà nước về di sản văn hóa

Trên cơ sở bốn nhóm tiêu chí đã nêu, 47 điểm khảo sát được phân thành 5 nhóm. Nhóm 1 gồm các điểm du lịch di sản trọng điểm, quy mô lớn, giá trị nổi bật và áp lực khách cao. Đây là các điểm giữ vai trò hạt nhân trong mạng lưới du lịch di sản của tỉnh, thường có nhiều lớp không gian và nhiều chủ thể cùng tham gia quản lý. Nhóm 2 là các điểm du lịch tâm linh - lễ hội, nơi cường độ sử dụng không gian lớn theo mùa vụ và vai trò vận hành thực tế của cơ sở tôn giáo rất rõ. Nhóm 3 là các điểm du lịch cộng đồng, làng quê, vùng đệm di sản và cảnh quan văn hóa; ở đây giá trị di sản gắn chặt với đời sống cư dân, nên bảo tồn không thể tách rời sinh kế và sự tham gia của cộng đồng. Nhóm 4 là các điểm di tích đơn lẻ, quy mô nhỏ, phân tán, nguồn lực hạn chế và thường được quản lý theo cơ chế kiêm nhiệm. Nhóm 5 là các điểm di tích đặc thù do doanh nghiệp, lực lượng vũ trang hoặc đơn vị chuyên biệt trực tiếp quản lý; nhóm này có ưu thế về nguồn lực và khả năng bảo vệ hiện trạng, nhưng thường thiếu chuyên môn sâu về di sản văn hóa.

3.3. Đề xuất mô hình quản lý

Việc lựa chọn mô hình trong nghiên cứu này không chỉ dựa trên loại hình di sản hay cấp xếp hạng, mà còn dựa trên đặc điểm không gian và yêu cầu quản lý đô thị của từng nhóm điểm đến. Mỗi mô hình gắn với một tổ hợp vấn đề quản lý cụ thể, từ điều phối quần thể rộng và kiểm soát sức chứa, đến quản lý thực hành nghi lễ, bảo vệ cảnh quan văn hóa cư trú hoặc chuẩn hóa cơ chế kiêm nhiệm tại các điểm nhỏ, phân tán. Trên cơ sở đó, năm mô hình quản lý tương ứng với năm nhóm điểm được đề xuất như sau:

1) Mô hình phối hợp đa bên đối với các di sản trọng điểm, quy mô lớn và áp lực khách cao như Yên Tử, Bạch Đằng, Nhà Trần Đông Triều hoặc Thương cảng Vân Đồn. Trong mô hình này, cơ quan nhà nước và ban quản lý chuyên trách giữ vai trò điều phối trung tâm, đồng thời thiết lập cơ chế phối hợp chính thức với doanh nghiệp vận hành dịch vụ, chính quyền địa phương, cộng đồng vùng đệm và các cơ sở tôn giáo. Trọng tâm của mô hình là tích hợp bảo tồn với quản lý không gian, sức chứa, dòng khách, hạ tầng và cơ chế tái đầu tư nguồn thu.

2) Mô hình đồng quản lý nhà nước và cơ sở tôn giáo đối với các điểm du lịch tâm linh - lễ hội. Mô hình này phù hợp với các chùa, đền, miếu và cụm tín ngưỡng, nơi cơ sở tôn giáo, ban quản lý hoặc người trực tiếp trông coi giữ vai trò vận hành thực tế rất lớn. Trong mô hình này, nhà nước xác lập quy chế quản lý, giới hạn can thiệp, quy định kiểm soát không gian và cơ chế giám sát; còn cơ sở tôn giáo phối hợp vận hành nghi lễ, tổ chức lễ hội, quản lý công đức và bảo vệ công trình thờ tự.

3) Mô hình quản lý dựa vào cộng đồng đối với các điểm du lịch làng quê, cảnh quan văn hóa và vùng đệm di sản, nơi giá trị di sản gắn trực tiếp với không gian sống và sinh kế cư dân. Trong mô hình này, chính quyền và ban quản lý giữ vai trò hỗ trợ về thể chế, kỹ thuật và giám sát; cộng đồng tham gia trực tiếp vào bảo vệ, khai thác, diễn giải, truyền thông và giám sát việc phân phối lợi ích. Điều kiện then chốt là phải thể chế hóa cơ chế tham vấn và chia sẻ lợi ích, nếu không sự tham gia của cộng đồng sẽ chỉ dừng ở mức huy động hình thức.

4) Mô hình quản lý kiêm nhiệm theo hướng chuẩn hóa đối với các di tích đơn lẻ, quy mô nhỏ, phân tán. Cấp xã hoặc ban quản lý chung có thể tiếp tục kiêm nhiệm, nhưng phải được chuẩn hóa bằng bộ quy chế hoạt động, quy trình xử lý tu bổ - tôn tạo, biểu mẫu giám sát, danh mục hoạt động được phép và không được phép, cùng với cơ chế hỗ trợ chuyên môn định kỳ. Mục tiêu là nâng cao chất lượng quản lý tối thiểu cho các điểm nhỏ mà không làm tăng quá nhiều chi phí tổ chức bộ máy.

5) Mô hình phối hợp đặc thù phù hợp với các di tích do doanh nghiệp, lực lượng vũ trang hoặc cơ quan chuyên biệt trực tiếp quản lý. Ưu điểm của mô hình là khả năng huy động nguồn lực nhanh và

bảo vệ hiện trạng tương đối tốt; hạn chế là thiếu chuyên môn di sản và nguy cơ ưu tiên mục tiêu ngành hơn yêu cầu bảo tồn. Vì vậy, cần thiết lập cơ chế phối hợp bắt buộc giữa đơn vị trực tiếp quản lý với cơ quan chuyên môn về di sản để bảo đảm mọi hoạt động tu bổ, tôn tạo, tiếp nhận hiện vật, phát huy giá trị và tổ chức tham quan đều tuân thủ đúng quy định.

3.4. Hệ thống giải pháp quản lý và điều kiện triển khai

Để các mô hình đề xuất có thể vận hành trong thực tiễn, hệ thống giải pháp cần được xây dựng như một bộ công cụ quản lý đô thị tích hợp, bám sát đặc trưng không gian, cường độ khai thác du lịch, cấu trúc chủ thể quản lý và mức độ dễ bị tổn thương của từng nhóm di sản.

Về thể chế, phân cấp và phối hợp quản lý, cần hoàn thiện khung quy chế chung đối với di sản kiến trúc tại điểm du lịch, làm rõ quan hệ giữa quản lý di sản, du lịch, xây dựng và không gian. Khung này cần xác định đầu mối chủ trì ở cấp tỉnh, cơ chế phối hợp giữa Sở Văn hóa, Thể thao và Du lịch với các cơ quan liên quan, đồng thời phân định trách nhiệm của chính quyền cấp cơ sở, ban quản lý di tích, tổ chức tôn giáo, doanh nghiệp và cộng đồng. Đối với các điểm có nhiều chủ thể cùng tham gia, cần ban hành quy chế phối hợp riêng theo từng điểm hoặc từng cụm di tích trọng điểm.

Về quy hoạch không gian và kiểm soát cảnh quan, cần tích hợp nội dung bảo tồn di sản kiến trúc vào quy hoạch đô thị, quy hoạch nông thôn và quy hoạch du lịch. Đối với các điểm chịu áp lực khách lớn, cần xác lập rõ vùng bảo vệ, vùng đệm, hành lang tầm nhìn, tuyến tiếp cận, không gian dịch vụ và giới hạn xây dựng mới. Bổ sung công cụ quản lý sức chứa, mật độ xây dựng, tầng cao, hình thức kiến trúc và tổ chức mặt bằng dịch vụ.

Về tổ chức bộ máy và nâng cao năng lực, cần phân biệt rõ yêu cầu nhân sự giữa các mô hình. Đối với di sản trọng điểm, bộ máy quản lý phải có năng lực điều phối liên ngành và quản trị điểm đến. Đối với các điểm do cấp xã hoặc ban quản lý chung phụ trách, cần xây dựng bộ quy trình chuẩn về quản lý hiện trạng, giám sát tu bổ, quản lý lễ hội, xử lý dịch vụ và báo cáo định kỳ; đồng thời tổ chức hỗ trợ kỹ thuật theo tuyến từ cấp tỉnh hoặc cấp vùng.

Về cộng đồng, cơ sở tôn giáo và doanh nghiệp, cần chuyển từ cơ chế huy động mang tính vận động sang cơ chế tham gia có quy định rõ. Với các điểm tâm linh - lễ hội, vai trò của sư trụ trì, ban quản lý, thủ từ hay người trực tiếp trông coi cần được xác lập bằng quy chế phối hợp. Với các điểm du lịch cộng đồng, người dân cần được tham gia từ khâu lập kế hoạch, giám sát can thiệp không gian đến khai thác dịch vụ và chia sẻ lợi ích. Với doanh nghiệp, cần quy định minh bạch về phạm vi đầu tư, quyền khai thác dịch vụ, nghĩa vụ bảo tồn và trách nhiệm công khai tài chính.

Về nguồn lực tài chính và kinh tế di sản. Thiết lập cơ chế tái đầu tư ổn định hơn từ hoạt động du lịch cho công tác bảo tồn. Nguồn thu từ vé, dịch vụ và công đức cần được quản lý theo hướng công khai, có tỷ lệ tái đầu tư cho bảo tồn, quản lý vận hành và lợi ích cộng đồng vùng đệm; các điểm có doanh nghiệp tham gia hoặc nguồn xã hội hóa lớn cần có cơ chế giám sát tài chính.

Về khoa học, công nghệ và chuyển đổi số. Hình thành cơ sở dữ liệu thống nhất về di sản kiến trúc tại điểm du lịch trên phạm vi toàn tỉnh. Cơ sở dữ liệu này cần tích hợp hiện trạng kiến trúc, bản đồ không gian, thông tin tu bổ, tình trạng bảo tồn, dữ liệu vận hành du lịch và lịch sử can thiệp. Đối với các điểm trọng điểm, có thể ưu tiên áp dụng GIS, quét ba chiều và hệ thống giám sát thông minh; đối với các điểm quy mô nhỏ, cần trước hết chuẩn hóa hồ sơ số, ảnh hiện trạng, nhật ký bảo trì và biểu mẫu báo cáo định kỳ.

Để các giải pháp trên khả thi, cần triển khai theo lộ trình phù hợp. Giai đoạn đầu nên tập trung vào ba nhiệm vụ nền tảng: Hoàn thiện quy chế phối hợp, chuẩn hóa dữ liệu và lựa chọn một số điểm đại diện để thí điểm theo từng mô hình. Giai đoạn tiếp theo mới mở rộng sang kiểm soát không gian, cơ chế tài chính và chuyển đổi số ở quy mô lớn hơn. Cách tiếp cận này vừa cho phép xử lý các điểm nghẽn cấp bách, vừa tránh dàn trải nguồn lực và tạo cơ sở đánh giá hiệu quả trước khi nhân rộng.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy hệ thống quản lý di sản kiến trúc tại các điểm du lịch ở tỉnh Quảng Ninh hiện nay vẫn chủ yếu vận hành theo mô hình quản lý nhà nước, nhưng trong thực tiễn đã xuất hiện xu hướng chuyển dịch sang quản trị đa chủ thể với sự tham gia ngày càng rõ của cộng đồng, cơ sở tôn giáo, doanh nghiệp và các đơn vị quản lý đặc thù. Đồng thời, chất lượng quản lý giữa các nhóm di sản bộc lộ sự phân hóa đáng kể do khác biệt về quy mô không gian, cường độ khai thác du lịch, nguồn lực đầu tư và cấu trúc quản trị tại từng điểm.

Kết quả cốt lõi của nghiên cứu là cho thấy vấn đề không nằm ở việc áp dụng một mô hình quản lý đồng nhất cho toàn tỉnh, mà ở việc lựa chọn mô hình phù hợp với đặc điểm của từng nhóm điểm du lịch có di sản kiến trúc. Trên cơ sở đó, nghiên cứu phân loại 47 điểm khảo sát thành 5 nhóm và đề xuất 5 mô hình quản lý tương ứng gồm: Phối hợp đa bên; Đồng quản lý giữa nhà nước và cơ sở tôn giáo; Quản lý dựa vào cộng đồng; Quản lý kiêm nhiệm theo hướng chuẩn hóa; và Phối hợp đặc thù với chủ thể quản lý trực tiếp.

Đóng góp của nghiên cứu là đặt di sản kiến trúc trong cấu trúc quản lý không gian của điểm đến dưới góc nhìn quản lý đô thị. Theo đó, quản lý di sản không thể tách rời khỏi quy hoạch, kiểm soát xây dựng, tổ chức cảnh quan, điều tiết hạ tầng và cơ chế phối hợp đa chủ thể trong vận hành điểm đến. Về mặt thực tiễn, kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng như cơ sở tham khảo cho việc xây dựng cơ chế quản lý di sản gắn với phát triển du lịch bền vững ở tỉnh Quảng Ninh và tại các địa phương có điều kiện tương đồng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Graham, B., Ashworth, G.J., Tunbridge, J.E. A Geography of Heritage: Power, Culture and Economy. Arnold, London, 2000.

[2] Quốc hội. Luật Du lịch số 09/2017/QH14. 2017.

[3] Quốc hội. Luật Di sản văn hóa số 45/2024/QH15. 2024.

[4] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15. 2024.

[5] Ripp, M., Rodwell, D. "The governance of urban heritage". The Historic Environment: Policy & Practice, 7(1), tr. 81-108, 2016.

[6] Sở Văn hóa và Thể thao Quảng Ninh. "Phê duyệt danh mục di tích lịch sử - văn hóa và danh lam thắng cảnh trên địa bàn tỉnh Quảng Ninh". 2025. Truy cập tại: Cổng thông tin Sở Văn hóa và Thể thao Quảng Ninh (truy cập ngày 09/3/2026).

[7] Smith, L. Uses of Heritage. Routledge, London, 2006.

[8] Throsby, D. "Heritage Economics: A Conceptual Framework". Trong: Licciardi, G., Amirtahmasebi, R. (chủ biên), The Economics of Uniqueness: Investing in Historic City Cores and Cultural Heritage Assets for Sustainable Development. World Bank, Washington DC, 2012.

[9] Timothy, D.J., Boyd, S.W. Heritage Tourism. Pearson Education, Harlow, 2003.

[10] UBND tỉnh Quảng Ninh. Quyết định số 867/QĐ-UBND ngày 03/04/2023 về việc phê duyệt Đề án bảo tồn, tôn tạo và phát huy giá trị hệ thống di tích lịch sử văn hóa và danh lam thắng cảnh tỉnh Quảng Ninh giai đoạn 2021-2030. 2023.

[11] UBND tỉnh Quảng Ninh. Quyết định số 4166/QĐ-UBND ngày 01/11/2025 về việc thành lập Ban Quản lý Di sản thế giới Vịnh Hạ Long - Yên Tử. 2025.

[12] UBND tỉnh Quảng Ninh. "Quảng Ninh đón 4,1 triệu lượt khách trong 2 tháng đầu năm". 2026. Truy cập tại: Cổng thông tin điện tử tỉnh Quảng Ninh (truy cập ngày 09/3/2026).

[13] UBND tỉnh Quảng Ninh. "Đưa du lịch Quảng Ninh trở thành kinh tế mũi nhọn". 2026. Truy cập tại: Cổng thông tin điện tử tỉnh Quảng Ninh (truy cập ngày 09/03/2026).

[14] Waterton, E., Smith, L. "The Recognition and Misrecognition of Community Heritage". International Journal of Heritage Studies, 16(1-2), tr. 4-15, 2010.

■Ngày nhận bài: 28/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Chuyển dịch TOD sang mạng lưới vùng tại TP Hồ Chí Minh: Khung chính sách và chiến lược phân tầng không gian

Shifting TOD to regional network in HCMC: Policy framework and Spatial stratification strategy

> THS.KTS NGUYỄN DUY THANH
Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM; Công ty TNHH Không gian Phương Đông
Email: thanhplanner@gmail.com

TÓM TẮT

Mô hình phát triển định hướng giao thông công cộng (TOD) tại TP.HCM đang cần tái cấu trúc để khẳng định vai trò hạt nhân dẫn dắt vùng Đông Nam Bộ. Bài viết nghiên cứu sự dịch chuyển tư duy TOD từ cấp độ cục bộ (nhà ga, tuyến và hành lang) sang mạng lưới kết nối vùng. Trước bối cảnh không gian sáp nhập mạnh mẽ giữa TP.HCM và các cực tăng trưởng kinh tế trọng điểm (Bình Dương, Bà Rịa - Vũng Tàu) cùng trợ lực từ các cơ chế đặc thù, nghiên cứu đã nhận diện rõ những khoảng trống trong quy hoạch TOD hiện hữu. Bằng phương pháp trắc lượng thư mục và phân tích chính sách, bài báo đề xuất Khung chính sách TOD mạng lưới vùng và chiến lược phân tầng không gian (chồng lớp đô thị, kinh tế và số) cho TP.HCM. Các đề xuất hướng tới tối ưu hóa nội lực, thiết lập không gian cửa ngõ linh hoạt, nhằm giải quyết bài toán cân bằng giữa động lực và phản lực trong quy hoạch tổng thể đến năm 2045, tầm nhìn dài hạn 100 năm.

Từ khoá: TOD; Thành phố Hồ Chí Minh; mạng lưới vùng; chính sách đô thị; phân tầng không gian.

ABSTRACT

The Transit-Oriented Development (TOD) model in Ho Chi Minh City (HCMC) requires restructuring to assert its role as the core driver of the Southeast region. This paper examines the paradigm shift in TOD from a localized scale (stations, lines, and corridors) to a regional connectivity network. In the context of profound spatial integration between HCMC and key economic growth poles (Binh Duong, Ba Ria - Vung Tau), coupled with the leverage of special institutional mechanisms, the study clearly identifies gaps in current TOD planning. Employing bibliometric and policy analysis methods, the paper proposes a Regional Network TOD Policy Framework and a spatial stratification strategy (layering urban, economic, and digital dimensions) for HCMC. These proposals aim to optimize internal resources and establish flexible gateway spaces, thereby resolving the balance between driving and counteracting forces within the master plan towards 2045, with a 100-year long-term vision.

Keywords: TOD; HCMC; regional network; urban policy; spatial stratification.

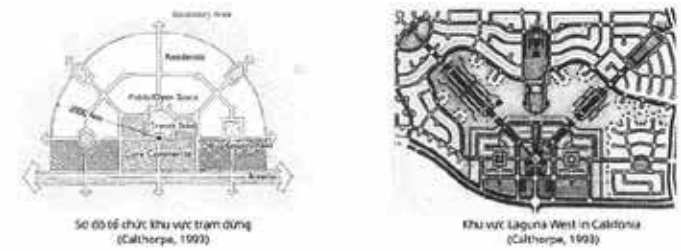
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô hình TOD tại TP.HCM đang đứng trước yêu cầu cấp thiết dịch chuyển từ cục bộ nhà ga, mạng lưới, hành lang sang định hướng mạng lưới vùng. Cấu trúc tuyến tính hiện hữu đang bộc lộ giới hạn phân bổ nguồn lực trước áp lực đô thị hóa, đòi hỏi tích hợp đồng bộ với mạng lưới giao thông vùng. Đòn bẩy cho sự chuyển dịch này là hệ thống thể chế đột phá. Các Nghị quyết 98/2023/QH15, 24-NQ/TW và 31-NQ/TW cho phép thí điểm TOD gắn với cơ chế khai thác quỹ đất, tạo điều kiện để Thành phố linh hoạt vận dụng các công cụ tài chính và tháo gỡ những rào cản pháp lý truyền thống. Đồng thời, thực tiễn tương tác không gian ngày càng chặt chẽ với khu vực đô thị sân bay Long Thành (Đồng Nai) và hành lang kinh tế xuyên Á phía Tây Bắc (Tây Ninh) đang làm mờ dần ranh giới hành chính, qua đó đặt ra yêu cầu cấp thiết về xây dựng khung chính sách TOD quy mô vùng cùng chiến lược phân tầng không gian, làm nền tảng cho tái cấu trúc đô thị theo hướng bền vững với tầm nhìn 100 năm.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Tiến trình phát triển lý thuyết về TOD

Giai đoạn trước 2000, tư duy hình thái học cấp vi mô: Kế thừa ý tưởng đô thị vệ tinh của Howard (1898) và bán kính đi bộ của Perry (1929), Calthorpe (1993) nêu khái niệm TOD với phát triển nén, đa chức năng. Bertolini (1999) tiếp nối bằng việc lượng hóa mô hình qua lý thuyết nhị nguyên Nút - Nơi chốn (Node-Place). Thực tiễn sơ khởi được minh chứng qua dự án Laguna West (Mỹ) của Calthorpe và khu ga Rijswijk (Hà Lan) (Bertolini, 1999).



Hình 1. Mô hình TOD và Dự án Laguna West. (*Nguồn: Calthorpe, P. 1993)*

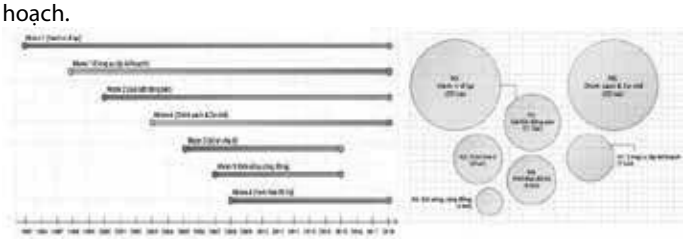
Giai đoạn 2000-2010, tư duy mạng lưới cấp trung mô: chuyển sang hệ hình cấu trúc mạng lưới và trục hành lang. Dittmar và Ohland (2004) thiết lập Thuyết Loại hình học nhằm phân tầng chức năng ga, trong khi Ewing và Cervero (2010) chuẩn hóa biến số "5Ds", gắn kết các nút rời rạc thành tuyến tiếp cận điểm đến. Điển hình cho giai đoạn này là hành lang Rosslyn-Ballston (Mỹ) và mạng lưới đường sắt Perth (Úc) (Curtis et al., 2009).

Giai đoạn 2011-2019, tích hợp quản trị vĩ mô: TOD trở thành công cụ kinh tế thông qua thuyết thu giữ giá trị đất (LVC) của Suzuki, Cervero và Iuchi (2013). *Tokyo với hành lang Tokyu Den-en-toshi đánh dấu bước chuyển dịch quan trọng sang mô hình vùng,* tư nhân hoá kết hợp đô thị vệ tinh dựa trên địa tô (Suzuki et al., 2013), cùng chiến lược "Đường sắt + Bất động sản" (R+P) tại Hồng Kông, cho phép tài trợ ngược cho hạ tầng quy mô lớn.

Giai đoạn 2020-nay, tư duy thích ứng và công bằng cấp siêu vĩ mô: TOD chuyển sang cấu trúc đa chiều, chú trọng tính đàn hồi (Yazdani et al., 2024), hạ tầng xanh (Wang et al., 2023) và công bằng xã hội - eTOD (Ibraeva et al., 2020). *Paris với siêu mạng lưới Grand Paris Express trở thành hình mẫu đương đại cho bước chuyển dịch TOD sang quy mô mạng lưới vùng tích hợp*, tái định hình không gian đa trung tâm xuyên ranh giới hành chính (Staricco và Brovarone, 2020; Barber, 2020).

2.2. Các bài nghiên cứu về TOD trên thế giới

Theo Ibraeva và cộng sự (2020) dựa trên 78 bài báo (1995-2018), 7 nhóm chủ đề, tập trung vào Chính sách quy hoạch - Cơ chế thực hiện (21 bài) và Tác động đến hành vi đi lại (20 bài). Còn lại chiếm tỷ trọng thấp, gồm: giá bất động sản, vị trí phân bố nhà ở, hình thái không gian đô thị, đời sống cộng đồng và các công cụ lập quy hoạch.



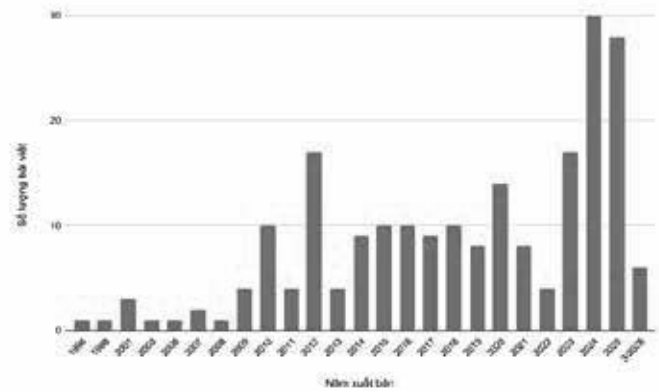
Hình 2. Minh hoạ nghiên cứu về TOD trên thế giới. (*Nguồn: Minh họa theo dữ liệu của Anna Ibraevaa và cộng sự, 2020)*

2.2. Các nghiên cứu Trung Quốc thực hiện

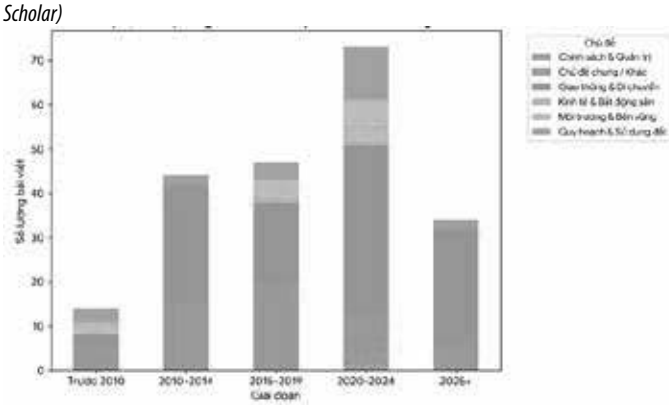
Theo Wang và Xia (2024), nghiên cứu trên 2.846 bài báo quốc tế và 4.016 bài báo tại Trung Quốc cho thấy tiến trình đô thị hóa nhanh tiến hành song hành với giao thông công cộng, học hỏi mô hình TOD từ thế giới, nhưng thiết kế riêng biệt, đặc thù địa phương (như "TOD + Công viên" tại Thành Đô hay "Trung tâm vi mô" tại Bắc Kinh), xu hướng mở rộng từ nhà ga cục bộ sang cấp độ mạng lưới vùng đô thị lớn.

2.3. Các nghiên cứu TOD tại TP.HCM và xu hướng mới

Với từ khoá "TOD" and "HCMC" trên Google Scholar (1996-2026) có 212 bài báo, tập trung vào kỹ thuật giao thông (111 bài), nhóm chính sách và quản trị không gian vùng chỉ chiếm tỷ lệ rất nhỏ (3 bài), tuy nhiên đang có sự dịch chuyển đa ngành. Kỷ yếu hội thảo TOD (Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM, 2026) với 51 bài, trọng tâm nghiên cứu hướng sang quy hoạch hình thái đô thị, bản sắc văn hóa và cơ chế chính sách. Điều này cho thấy nghiên cứu TOD tại TP.HCM cần chuyển dịch sang chiến lược không gian và quản trị mạng lưới vùng.



Hình 3. Bài viết liên quan từ khoá "TOD" and "HCMC". (*Nguồn: Tổng hợp từ Google Scholar)*



Hình 4. Chủ đề nghiên cứu theo từ khoá "TOD" and "HCMC". (*Nguồn: Tổng hợp từ Google Scholar)*

2.4. Nghiên cứu chính sách

Pháp lý đang tạo ra những đột phá, Luật Quy hoạch 2024 cùng Nghị quyết 24-NQ/TW và 31-NQ/TW đã định hình hành lang liên kết vùng Đông Nam Bộ, Nghị quyết 98/2023/QH15 thí điểm TP.HCM thu hồi đất quanh nhà ga và Vành đai 3 để đấu giá phát triển hạ tầng, và củng cố bởi Điều 79 Luật Đất đai 2024 về khai thác quỹ đất vùng phụ cận. Sự cộng hưởng thể chế này cung cấp cơ sở pháp lý vững chắc để bứt phá mô hình TOD từ quy mô điểm, tuyến cục bộ sang mạng lưới kết nối vùng, đặt ra yêu cầu cấp thiết về một chiến lược phân tầng không gian tương xứng.

2.5. Bài học kinh nghiệm về TOD mạng lưới vùng

Tại Tokyo, Nhật Bản: Tại vùng Tokyo-Yokohama, mô hình TOD gắn liền với vai trò của khu vực tư nhân, tiêu biểu như Tokyu Corporation. Các đơn vị này phát triển đồng bộ mạng lưới liên vùng kết hợp các đô thị vệ tinh. Công cụ thu hồi giá trị đất để tái đầu tư hạ tầng, tạo ra hệ sinh thái dịch vụ khép kín quanh nhà ga, giải quyết bài toán tài trợ chéo và giảm sức nén cho lõi trung tâm (Wang và Xia, 2024).

Tại Paris, Pháp: Là điển hình tái cấu trúc mạng lưới vùng, thông qua Grand Paris Express, lưới đường sắt tự động dài 200 km kết nối các khu vực ngoại vi mà không cần đi xuyên tâm đô thị, tập trung kiến tạo các cực tăng trưởng mới tại vùng Grande Couronne, giúp phân tầng lại không gian kinh tế và xã hội trên diện rộng. Đây là chiến lược cốt lõi để tối ưu hóa năng lực vận hành và thúc đẩy sự phát triển cân bằng cho toàn vùng Île-de-France (Ibraeva và cộng sự, 2020).

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trắc lượng thư mục: Bài viết tổng hợp về TOD đã công bố, kết hợp truy xuất dữ liệu từ Google Scholar (giai đoạn 1996-2026, từ khóa "TOD" và "Ho Chi Minh City"), kết hợp tổng hợp từ kỷ yếu hội thảo chuyên ngành để tìm khoảng trống nghiên cứu.

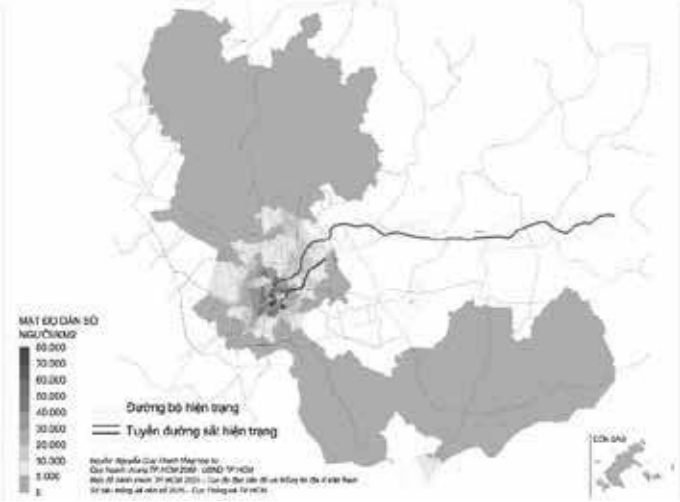
Nghiên cứu chính sách: Tiến hành rà soát, phân tích văn bản pháp lý và các cơ chế đặc thù (Luật Đất đai, Nghị quyết 98, Nghị quyết 188) nhằm tìm kiếm pháp lý cho mô hình TOD.

Phân tích bối cảnh không gian: Phương pháp phân tích bản đồ, số liệu dân số cấp xã năm 2025 và bản đồ không ảnh, đối chiếu Đồ án Quy hoạch chung TP.HCM đến năm 2040 để làm cơ sở nghiên cứu.

4. PHÂN TÍCH BỐI CẢNH

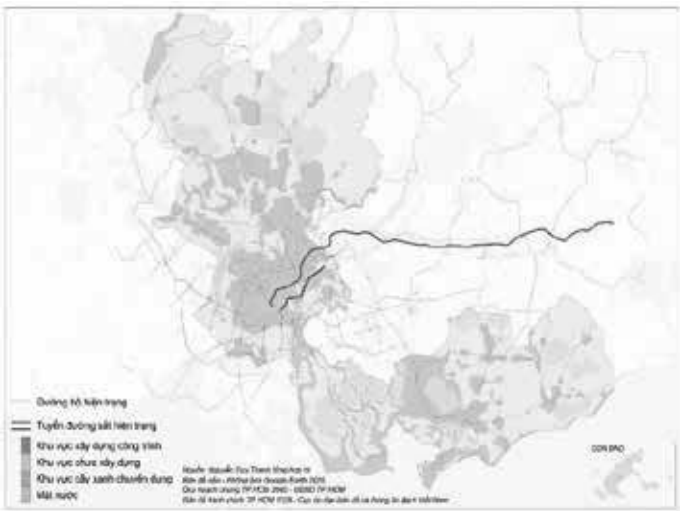
4.1. Bối cảnh TP.HCM sau sáp nhập

TP.HCM đang trong quá trình tái cấu trúc với quy mô khoảng 14 triệu dân, giữ vai trò trung tâm trong vùng Đông Nam Bộ với tổng dân số khoảng 19 triệu người. Do đó, công tác quy hoạch cần gắn kết chặt chẽ với bối cảnh phân bố dân cư và không gian xây dựng đô thị trong mối liên hệ vùng (Hình 5 - 7)



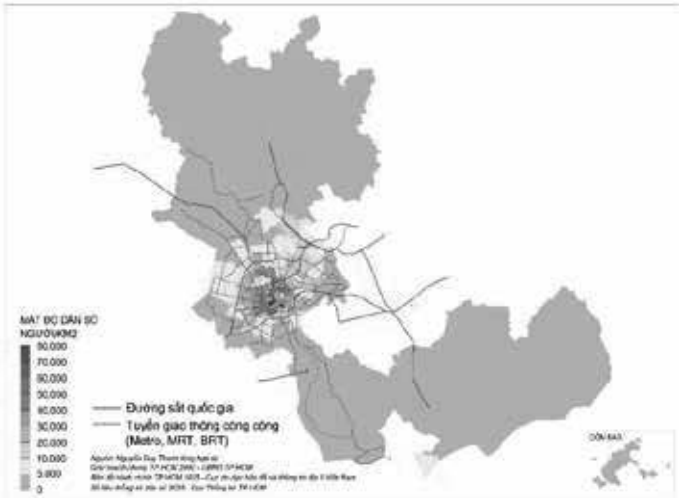
Hình 5. Hiện trạng giao thông và dân cư TP.HCM 2025

(Nguồn: Nguyễn Duy Thanh tổng hợp từ Quy hoạch chung TP.HCM 2040 - UBND TP.HCM, Bản đồ hành chính TP.HCM 2025 - Cục đo đạc bản đồ và thông tin địa lí Việt Nam, Số liệu thống kê dân số 2025 - Cục Thống kê TP.HCM)



Hình 6. Hiện trạng giao thông và khu vực xây dựng công trình TP.HCM 2025

(Nguồn: Nguyễn Duy Thanh tổng hợp từ Bản đồ nền - Không ảnh Google Earth 2026, Quy hoạch chung TP.HCM 2040 - UBND TP.HCM, Bản đồ hành chính TP.HCM 2025 - Cục Đo đạc bản đồ và thông tin địa lí Việt Nam)



Hình 7. Quy hoạch giao thông công cộng TP.HCM và dân cư hiện trạng

(Nguồn: Nguyễn Duy Thanh tổng hợp từ Quy hoạch chung TP.HCM 2040 - UBND TP.HCM, Bản đồ hành chính TP.HCM 2025 - Cục đo đạc bản đồ và thông tin địa lí Việt Nam, Số liệu thống kê dân số 2025 - Cục Thống kê TP.HCM)

Trên thực tế, xu hướng liên kết vùng trong phát triển hạ tầng đô thị đang ngày càng rõ nét. Tuyến Metro số 1 được định hướng kéo dài đến Đồng Nai, trong khi TP.HCM được quy hoạch hệ thống đường sắt đô thị gồm 27 tuyến với tổng chiều dài khoảng 1.012 km (Thu Dịu, 2025). Bối cảnh này đặt ra yêu cầu chuyển đổi mô hình TOD từ tiếp cận cục bộ quanh nhà ga sang cấu trúc mạng lưới đa trung tâm quy mô vùng, nhằm đáp ứng nhu cầu luân chuyển không gian ngày càng gia tăng và khắc phục tình trạng thiếu đồng bộ trong cơ chế phối hợp liên tỉnh.

4.2. Thực trạng quy hoạch TOD tại TP.HCM

Việc tập trung nhà ga và khu đô thị quanh nhà ga, thiếu các công cụ quản trị vĩ mô (cơ chế BT mở rộng đa ngành, cơ chế san sẻ chi phí liên tỉnh) dẫn đến nghịch lý "TOD nhảy vọt": quyết sách hạ tầng đi trước nhưng cơ chế phân bổ nguồn lực theo sau không kịp. Điều này gây nguy cơ quá tập trung vào các lõi nén (nguồn lực dương) và đẩy vùng ngoại vi sinh thái (nguồn lực âm) vào suy thoái (Nguyễn Duy Thanh, 2026). Ngoài ra, sự đứt gãy giữa công nghệ số và kiến tạo nơi chốn khiến các dự án TOD dễ biến thành các khối "bê tông hóa", thiếu bản sắc sinh kế bản địa.

4.3. Tái định nghĩa "Vùng" trong TOD: Sự chồng lớp không gian

"Vùng" TOD vượt ra khỏi ranh giới hành chính, là sự chồng lớp (layering) của bốn hệ sinh thái:

Vùng kinh tế: Không gian luân chuyển chuỗi cung ứng, nơi cung - cầu lao động và cực công nghiệp ngoại vi tương tác trực tiếp với lõi dịch vụ.

Vùng xã hội: Không gian cộng đồng và kiến tạo nơi chốn, đóng vai trò "nơi chốn thứ ba".

Vùng môi trường: Không gian đệm ngoại vi, thực hiện chức năng trung hòa sinh thái và thích ứng biến đổi khí hậu cho lõi nén.

Vùng không gian số: kinh tế số, tạo lập "Nơi chốn thứ tư" (Digital Placemaking) nhằm tối ưu hóa quản trị.

4.4. Động lực và phản lực

Mô hình TOD được lợi thế từ Nghị quyết 98/2023/QH15 và 188/2025/QH15. Tuy nhiên, tầm nhìn dài hạn đối diện với "phản lực"

lớn từ nền kinh tế số, xu hướng làm việc trực tuyến làm giảm đáng kể nhu cầu di chuyển, xung đột trực tiếp với định hướng nén quanh nhà ga. Việc "nén" quá mức có thể gây dư thừa không gian vật lý trong 50-100 năm tới. Do đó, quy hoạch tổng thể phải thiết lập các kịch bản mô phỏng theo thời gian, tích hợp bài toán nguồn lực và phản lực, biến chính sách TOD thành "màng lọc điều tiết" để đô thị phát triển bền vững.

5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

5.1. Khung chính sách TOD mạng lưới vùng

Cơ chế chia sẻ chi phí và cơ hội trên phạm vi vùng: Khắc phục hạn chế của mô hình khai thác giá trị đất (LVC) cục bộ bằng cách điều tiết thặng dư từ nội đô lan tỏa ra cực vệ tinh, qua đó giảm sức nén đô thị hạt nhân, kích hoạt vùng đệm kinh tế tại Đồng Nai và Tây Ninh. Điển hình là chiến lược kết nối đồng bộ hạ tầng du lịch đường bộ và đường thủy, đường sắt du lịch Tây Ninh - TP.HCM (Nguyễn Duy Thanh, 2026) minh hoạ cơ chế chia sẻ lợi ích liên vùng.

Chính sách tài trợ chéo: Thặng dư tài chính từ quỹ đất thương mại vùng lõi (nguồn lực dương) phải được trích xuất tỷ lệ bắt buộc để "tài trợ chéo", góp phần duy tu hạ tầng gom và công viên sinh thái ngoại vi (Nguyễn Duy Thanh, 2026b), bảo đảm vùng đệm đủ sức cung cấp mảng xanh trung hòa, cung cấp lao động và tiêu thụ cho hệ thống.

Mở rộng mô hình thanh toán BT và Quỹ đầu tư TOD: Vận dụng Nghị định số 257/2025/NĐ-CP (Chính phủ, 2025), TP.HCM cần mở rộng thanh toán BT bằng tài nguyên phi truyền thống (không gian sinh thái, tín chỉ carbon, quỹ đất nông nghiệp). Đồng thời, thiết lập Quỹ đầu tư TOD để thẩm định minh bạch giá trị hoán đổi tài sản công, tách bạch năng lực xây lắp và năng lực tài chính của nhà đầu tư.

5.2. Chiến lược phân tầng không gian

Hệ thống TOD đóng vai trò khung tích hợp 3 lớp không gian chính:

Không gian đô thị (không gian xây dựng và không gian xã hội):

• **Chiến lược 1: Chuyển dịch từ tăng hệ số sử dụng đất sang tăng hiệu quả sử dụng không gian.** Lồng ghép thiết kế tích hợp 3D, tối ưu không gian ngầm kết nối sảnh ga và trục đi bộ đa tầng. Biến khối tích vật lý thành bộ máy hấp thụ dịch vụ thương mại thay vì chỉ gia tăng sức chứa dân số.

• **Chiến lược 2: Định hướng phát triển không gian cộng sinh cho vùng nén và ngoại vi.** Thiết lập ranh giới tăng trưởng cứng, bảo vệ vành đai nông - lâm nghiệp (Nghị định số 258/2025/NĐ-CP). Kiến tạo hành lang sinh thái liên vùng nhằm trung hòa đảo nhiệt (Nguyễn Duy Thanh, 2026).

• **Chiến lược 3: Tái cấu trúc không gian gắn liền với kiến tạo nơi chốn.** Việc xây các nhà ga và khu đô thị có thể ảnh hưởng kinh tế phi chính thức và sinh kế bản địa, vì vậy cần không gian nhượng quyền, hình thành "nơi chốn thứ ba" (Vũ, 2016) để gắn kết cộng đồng, bảo tồn di sản, biến nhà ga thành điểm đến văn hóa sống động thay vì một trạm luân chuyển cơ học (Lê, 2023), đồng thời định hướng các khu vực nhà ga và khu đô thị là điểm đến thay vì là một trạm trung chuyển, từ đó gia tăng dịch vụ và giá trị cộng đồng, giá trị nơi chốn, tác dụng tái cấp nguồn cung hành khách cho mạng lưới giao thông công cộng.

Không gian kinh tế (các không gian chức năng và nguồn nhân lực):

• **Chiến lược 4: Định hướng phát triển không gian kinh tế dựa trên nguồn lực phát triển.** Phân bổ chức năng theo sức chịu tải. Phát triển các siêu trung tâm (Super-hubs) tài chính nội đô; định vị các trạm vùng ven thành cực logistics và công nghiệp vệ tinh, bảo đảm chuỗi cung ứng luân chuyển liên tục.

• **Chiến lược 5: Phát triển các không gian kinh tế mới.** Tận dụng quỹ đất quanh ga phát triển mô hình kinh tế tuần hoàn, nông nghiệp đô thị công nghệ cao và kinh tế đêm, cung cấp rổ tài sản thanh toán đa dạng cho cơ chế BT mở rộng (Nguyễn Duy Thanh, 2026).

• **Chiến lược 6: Phát triển phù hợp nguồn nhân lực sơ cấp, thứ cấp, hiện tại và kế thừa.** Lồng ghép công cụ quy hoạch, phát triển quỹ nhà ở giá rẻ (eTOD). Điều này ngăn chặn hiện tượng chỉnh trang đẩy đuổi (gentrification) (City of Chicago, 2021) nhằm giữ chân lực lượng lao động phổ thông và thu hút tri thức.

Không gian số (hạ tầng số và nơi chốn số):

• **Chiến lược 7: Phát triển cơ sở hạ tầng công nghệ số ứng dụng cho quản lý và phát triển đô thị thông minh.** Lồng ghép hạ tầng viễn thông, mạng lưới cảm biến IoT đồng bộ để thu thập Big Data về lưu lượng, vi khí hậu (UBND TP.HCM, 2026), giúp điều tiết dòng người và nguồn lực hiệu quả.

• **Chiến lược 8: Tích hợp định hướng quản lý số thích ứng và dịch vụ số.** Chuyển đổi tư duy sang mô hình Không gian như một dịch vụ (Space as a Service). Số hóa các tiện ích quanh nhà ga, tạo hệ sinh thái dịch vụ không rào cản qua nền tảng di động.

• **Chiến lược 9: Xây dựng nền tảng nơi chốn số.** Thiết lập khái niệm "Nơi chốn thứ tư" (Digital Placemaking) thông qua công nghệ Bản sao số (Digital Twin), cho phép người dân và chuyên gia tương tác, tham gia đồng kiến tạo hình thái không gian ga trước khi xây dựng, mở ra một không gian sinh hoạt văn hóa và thương mại vô tận, gia tăng giá trị kinh tế số mà không tiêu tốn tài nguyên đất đai.

6. KẾT LUẬN

Việc chuyển dịch mô hình TOD tại TP.HCM sang tổng thể mạng lưới vùng mang tính chiến lược cấp thiết. Trước áp lực đô thị hóa và quy mô đầu tư hạ tầng khổng lồ, TP.HCM không nên áp dụng mô hình TOD lý thuyết hay nguyên bản từ các quốc gia phát triển mà cần đảm bảo tính khả thi là kiến tạo một hệ hình TOD mang tính bản địa, gắn liền với đặc thù không gian, văn hóa, sinh kế và lợi thế chính sách đặc thù. Bối cảnh sáp nhập và sự chuyển dịch hành vi trong nền kinh tế số đòi hỏi một tầm nhìn quy hoạch vượt khỏi các ranh giới hành chính. Để thực thi, Khung chính sách TOD mạng lưới vùng và Chiến lược phân tầng không gian là công cụ mang tính định hình. Các bộ công cụ này không chỉ giải quyết bài toán san sẻ chi phí, điều tiết nguồn lực giữa vùng nén và ngoại vi, mà còn là trục xương sống để TP.HCM tái cấu trúc thành công một siêu đô thị đa trung tâm, phát triển bền vững và bao trùm trong tầm nhìn 100 năm tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Chính trị. Kết luận số 49-KL/TW về Định hướng phát triển giao thông vận tải đường sắt Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2023.

[2] Barber, L. B. The mobilizing myths of the Grand Paris Express. Mobilities, 15(6), tr. 838-854, 2020, doi: 10.1080/17450101.2020.1713512.

[3] Bertolini, L. Spatial development patterns and public transport: the application of an analytical model in the Netherlands. Planning Practice and Research, 14(2), tr. 199-210, 1999, doi: 10.1080/02697459915724.

[4] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 06-NQ/TW về Quy hoạch, xây dựng, quản lý và phát triển bền vững đô thị Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2022.

[5] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 24-NQ/TW về Phát triển kinh tế - xã hội và bảo đảm quốc phòng, an ninh vùng Đông Nam Bộ đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2022.

[6] Bộ Chính trị. Nghị quyết số 31-NQ/TW về Phương hướng, nhiệm vụ phát triển TP.HCM đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2022.

[7] Calthorpe, P. The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream. Princeton Architectural Press, 1993.

[8] Cervero, R., Kockelman, K. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2(3), tr. 199-219, 1997, doi: 10.1016/S1361-9209(97)00009-9.

[9] 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, 2025.

[10] Chính phủ. Nghị định số 257/2025/NĐ-CP quy định chi tiết về việc thực hiện dự án áp dụng loại hợp đồng Xây dựng - Chuyển giao, 2025.

[11] Chính phủ. Nghị định số 258/2025/NĐ-CP về Quản lý công viên, cây xanh, mặt nước, 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, 2026.

[13] City of Chicago. Equitable Transit-Oriented Development (eTOD) Policy Plan. Chicago Plan Commission, 2021.

[14] Cục Đo đạc Bản đồ và Thông tin Địa lý Việt Nam. Bản đồ hành chính TP.HCM 2025, 2025.

[15] Cục Thống kê TP.HCM. Số liệu dân số trung bình sơ bộ cấp xã 2025, 2025.

[16] Curtis, C., Renne, J. L., Bertolini, L. Transit oriented development: Making it happen. Ashgate Publishing, 2009.

[17] Dittmar, H., Ohland, G. The new transit town: Best practices in transit-oriented development. Island Press, 2004.

[18] Enright, N. Grand Paris Express: Shaping the future of the Paris Region. Routledge, 2023.

[19] Ewing, R., Cervero, R. Travel and the built environment: a meta-analysis. Journal of the American Planning Association, 76(3), tr. 265-294, 2010, doi: 10.1080/01944361003766766.

[20] Google Earth. Bản đồ không ảnh, 2026.

[21] Howard, E. To-morrow: A peaceful path to real reform. Swan Sonnenschein, 1898.

[22] Ibraeva, A., Correia, G. H. de A., Silva, C., Antunes, A. P. Transit-oriented development: A review of research achievements and challenges. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 132, tr. 110–130, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2019.10.010.

[23] Lê, V. L. Tạo dựng "nơi chốn" trong không gian công cộng của khu đô thị mới - Hà Nội. Tạp chí Kiến trúc, số 6, 2023.

[24] Lyu, P., Bertolini, L., Pfeffer, K., Li, Z. Moving beyond the node-place model: exploring the experience of transit-oriented development. Journal of Urban Design, 28(1), tr. 45–65, 2023, doi: 10.1080/13574809.2022.2156661.

[25] Nguyễn Anh Tú. TOD trong bối cảnh công nghiệp và đô thị hoá tại Việt Nam: Tác động của sản xuất công nghiệp và phát triển nhà ở tới vận tải hành khách. Kỷ yếu Hội thảo khoa học, 2026.

[26] Nguyễn Duy Thanh. Định hướng phát triển không gian du lịch đáp ứng phát triển đô thị bền vững - Trường hợp nghiên cứu khu vực TP Tây Ninh cũ đến năm 2050. Kỷ yếu hội thảo khoa học Di sản văn hóa địa phương - Động lực phát triển không gian đô thị sáng tạo, tr. 134-153, 2026.

[27] Nguyễn Duy Thanh. Đề xuất chính sách phát triển TOD bền vững cho TP.HCM thông qua chiến lược nhảy vọt và mô hình không gian cộng sinh. Kỷ yếu hội thảo quốc tế TOD với Đường sắt đô thị, tr. 316-323, 2026.

[28] Papa, E., Lauwers, G. Smart accessibility: a 21st century strategy for sustainable urban development. Transportation Research Procedia, 8, tr. 3-14, 2015, doi: 10.1016/j.trpro.2015.06.002.

[29] Perry, C. The neighborhood unit. Regional Survey of New York and Its Environs, Volume VII, 1929.

[30] Quốc hội. Nghị quyết số 98/2023/QH15 về thí điểm một số cơ chế, chính sách đặc thù phát triển TP.HCM, 2023.

[31] Quốc hội. Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn số 47/2024/QH15, 2024.

[32] Quốc hội. Luật Đường sắt số 95/2025/QH15, 2025.

[33] Quốc hội. Luật Xây dựng số 135/2025/QH15, 2025.

[34] Quốc hội. Nghị quyết số 188/2025/QH15 về phát triển hệ thống mạng lưới đường sắt đô thị tại TP.HCM, 2025.

[35] Quốc hội. Nghị quyết số 260/2025/QH15 sửa đổi, bổ sung một số điều của Nghị quyết số 98/2023/QH15, 2025.

[36] Staricco, L., Brovarone, S. T. Promoting TOD through regional planning: A comparative analysis of two European case studies. European Planning Studies, 28(11), tr. 2235–2252, 2020, doi: 10.1080/09654313.2020.1752034.

[37] Suzuki, H., Cervero, R., Iuchi, K. Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development. World Bank Publications, 2013.

[38] Thu Dịu. TP.HCM quy hoạch 27 tuyến đường sắt đô thị với tổng chiều dài 1.012 km. Kinh tế & Đô thị Online, 2025.

[39] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 18/2025/QĐ-TTg về trình tự, thủ tục phê duyệt điều chỉnh cục bộ quy hoạch đô thị và nông thôn, 2025.

[40] Tokyu Corporation. Tama Garden City: A model for regional TOD and private-sector urban development. Tokyu Press, 2025.

[41] Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM. Kỷ yếu Hội thảo TOD với Đường sắt đô thị, 2026.

[42] UBND TP.HCM. Đề án phát triển hệ thống đường sắt đô thị TP.HCM theo Kết luận số 49-KL/TW, 2024.

[43] UBND TP.HCM. Đồ án Quy hoạch chung TP.HCM đến năm 2040, 2025.

[44] UBND TP.HCM. Kế hoạch chuyển đổi số và phát triển đô thị thông minh TP.HCM năm 2026, 2026.

[45] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 về phân loại đô thị, 2025.

[46] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 105/VBHN-VPQH hợp nhất Nghị quyết về thí điểm một số cơ chế, chính sách đặc thù phát triển TP.HCM, 2025.

[47] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 123/VBHN-VPQH hợp nhất Luật Đầu tư theo phương thức đối tác công tư, 2025.

[48] Văn phòng Quốc hội. Văn bản hợp nhất số 134/VBHN-VPQH hợp nhất Luật Đất đai, 2025.

[49] Vũ, V. A. Sự kết hợp giữa kiến tạo nơi chốn và TOD - Mô hình phát triển không gian đô thị gắn với đường sắt đô thị TP.HCM. Tạp chí Kiến trúc, số 10, 2016.

[50] Wang, L., Xia, H. A comprehensive overview of the development characteristics and future trends of TOD in China's urban rail transit system. Journal of Urban Rail Transit, 2024.

[51] Wang, R., Wu, W., Yao, Y., Tan, W. Green transit-oriented development: Spatial inequalities of visual green space provision around subway stations in Beijing. Journal of Environmental Management, 340, tr. 118093, 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118093.

[52] Yazdani, M., et al. Climate-resilient transit-oriented development: Integrating nature-based solutions into urban transport hubs. Sustainable Cities and Society, 102, tr. 105214, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.105214.

■Ngày nhận bài: 28/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Khảo sát chất lượng môi trường trong các xưởng làng nghề tái chế nhựa: Nghiên cứu điển hình tại làng Phan Bôi, tỉnh Hưng Yên

Investigation of environmental quality in plastic recycling workshops: Case study in phan boi village, Hung Yen province

> TS ĐỖ HỒNG ANH, TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO, PGS.TS ĐẶNG THỊ THANH HUYỀN*
Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: huyendtt@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá hiện trạng phát sinh chất thải và rủi ro môi trường tại một cơ sở tái chế nhựa điển hình ở làng Phan Bôi, tỉnh Hưng Yên. Kết quả cho thấy nhiều thông số nước thải (COD, BOD_5, TSS, Coliform) vượt quy chuẩn, phản ánh tải lượng ô nhiễm hữu cơ cao và nguy cơ đối với nguồn tiếp nhận. Môi trường lao động ghi nhận sự hiện diện của bụi mịn, khí thải và nhiệt độ cao, tiềm ẩn tác động bất lợi đến sức khỏe người lao động, vấn đề bảo hộ lao động và nhận thức về an toàn lao động còn hạn chế. Nghiên cứu đề xuất các giải pháp trọng tâm gồm đầu tư hệ thống xử lý nước thải đạt chuẩn, tăng cường bảo hộ và đào tạo an toàn lao động, kiểm soát bụi - khí thải, bố trí dải cây xanh cách ly. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho các giải pháp quản lý môi trường, góp phần nâng cao chất lượng môi trường và phát triển bền vững các làng nghề tái chế nhựa tại Việt Nam.

Từ khóa: Tái chế nhựa; làng nghề; môi trường; an toàn lao động; sức khỏe môi trường.

ABSTRACT

This study assesses the current state of waste generation and environmental risks at a typical plastic recycling facility in Phan Boi village, Hung Yen province. The results show that many wastewater parameters (COD, BOD_5, TSS, Coliform) exceed standards, reflecting high organic pollution loads and risks to the receiving water body. The working environment exhibits the presence of fine dust, exhaust fumes, and high temperatures, potentially causing adverse impacts on workers' health. Occupational safety and health awareness remain limited. The study proposes key solutions including investing in a standard wastewater treatment system, strengthening occupational safety and health training, controlling dust and exhaust fumes, and establishing green buffer zones. The research provides a scientific basis for environmental management solutions, contributing to improved environmental quality and sustainable development of plastic recycling villages in Vietnam.

Keywords: Plastic recycling; craft villages; environment; workplace safety; health and environment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các vật liệu có khả năng tái sử dụng hoặc tái chế chiếm khoảng 15-20% tổng lượng chất thải rắn tại Việt Nam, hoạt động tái chế chủ yếu tập trung tại các làng nghề, với các vật liệu phổ biến như kim loại, giấy và nhựa [1]. Các chất ô nhiễm từ hoạt động tái chế nhựa chủ yếu phát sinh trong công đoạn rửa và tạo hạt, gây tác động tiêu cực đến chất lượng nước và không khí. Nồng độ chất hữu cơ bay hơi (VOC) cao quanh các nhà máy chế biến nhựa có liên quan đến tỷ lệ cao các triệu chứng về da niêm mạc và hô hấp ở cư dân lân cận [3], [4]. Các hợp chất gây mùi như 2,4-dimethyl-heptane, 4-methyl-octane và octamethylcyclotetrasiloxane được xác định có liên hệ chặt chẽ với phát thải từ nhựa tái chế [5]. Vi nhựa thứ cấp có thể phát tán vào không khí dưới dạng các hạt nhỏ (<10 µm), tiềm ẩn nguy cơ đối với sức khỏe con người và góp phần làm gia tăng phát thải các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi không chứa methane [6]. Trong giai đoạn 2012-2015, có 47 làng nghề trên cả nước bị ô nhiễm môi trường nghiêm trọng, trong đó 08 làng nghề thuộc lĩnh vực tái chế phế liệu (17%) [1]. Hưng Yên là một trong những địa phương tiêu biểu với mật độ làng nghề tái chế cao, hiện có 59 làng nghề tái chế, trong đó 54 làng đang hoạt động, mỗi làng có từ 400-700 hộ sản xuất [7].

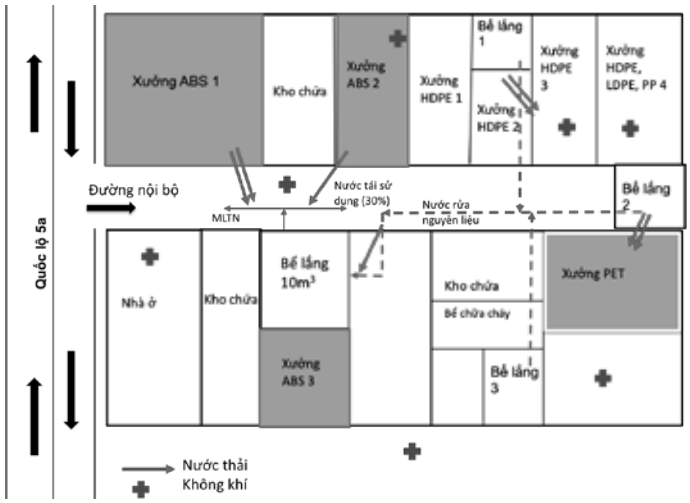
Mặc dù đã có các nghiên cứu về ô nhiễm tại làng nghề tái chế ở Việt Nam, phần lớn tập trung vào mô tả hiện trạng hoặc đánh giá từng thành phần môi trường riêng lẻ. Các nghiên cứu tích hợp đồng thời nước thải, chất lượng không khí và điều kiện lao

động ở cấp cơ sở sản xuất còn hạn chế. Mối liên kết giữa đánh giá rủi ro môi trường và đề xuất các giải pháp quản lý khả thi cho mô hình sản xuất quy mô nhỏ vẫn chưa được làm rõ. Khoảng trống này làm hạn chế cơ sở khoa học phục vụ hoạch định chính sách và cải thiện hiệu quả quản lý môi trường tại các làng nghề. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm đánh giá hiện trạng phát sinh chất thải và các rủi ro môi trường tại một cơ sở tái chế nhựa điển hình ở làng Phan Bôi, tỉnh Hưng Yên, thông qua phương pháp tiếp cận tổng hợp kết hợp điều tra xã hội học và quan trắc môi trường. Điểm đóng góp chính của nghiên cứu là: (i) cung cấp dữ liệu thực địa về chất lượng nước thải, không khí và môi trường lao động; (ii) nhận diện các nguồn rủi ro môi trường trọng yếu trong mô hình tái chế làng nghề; (iii) đề xuất các giải pháp quản lý và kỹ thuật theo hướng khả thi, phù hợp với điều kiện sản xuất quy mô nhỏ. Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung bằng chứng khoa học cho việc thúc đẩy phát triển bền vững ngành tái chế nhựa tại Việt Nam, cung cấp bằng chứng thực nghiệm làm cơ sở khoa học cho việc xây dựng các chiến lược quản lý môi trường đối với các hệ thống tái chế quy mô nhỏ tại các khu vực đang công nghiệp hóa nhanh.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khảo sát và phỏng vấn: dữ liệu được thu thập thông qua phỏng vấn bằng bảng hỏi đối với 02 cán bộ quản lý, 19 công nhân và 20 cư dân lân cận nhằm xác định quy trình sản xuất, điều kiện lao động và các nguồn phát thải chính.

Quan trắc chất lượng môi trường: 8 mẫu nước thải (BOD5, COD, TSS, Coliform, so sánh với QCVN 40:2025/BTNMT); 07 mẫu không khí (bụi, độ ồn, NO2, SO2, đối chiếu với QCVN 26/2016/BYT, tiêu chuẩn của Tổ chức Y tế thế giới, WHO và Liên minh châu Âu, EU) được thể hiện trong Hình 1. Quy trình lấy mẫu, bảo quản và phân tích mẫu được thực hiện theo tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành.



Hình 1. Vị trí lấy mẫu

Đánh giá mức độ rủi ro của các nguy cơ: thực hiện phân tích trọng số rủi ro, mỗi nguy cơ được đánh giá dựa trên khả năng xảy ra và tác động mà nó mang đến đối với công nhân làm việc trong cơ sở tái chế, sử dụng ma trận đánh giá rủi ro 5 mức được thể hiện ở Bảng 1 [8]. Công thức (1) lượng hóa nguy cơ của rủi ro:

$$RS = C \times E \times P \quad (1)$$

Trong đó: RS: trọng số rủi ro

C: các rủi ro có thể xảy ra trong hoạt động của cơ sở

E: tần suất xảy ra rủi ro

P: xác suất xảy ra rủi ro

Bảng 1. Ma trận đánh giá rủi ro

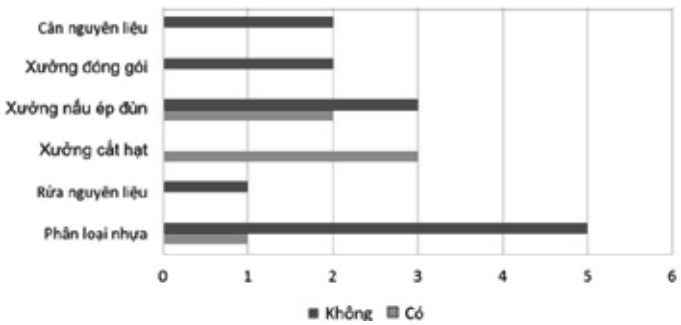
Mức độ tác động của rủi ro	Trọng số rủi ro	Giải pháp
Cực kỳ nghiêm trọng	> 500	Hoạt động cần phải dừng ngay
Nguy cơ cao	300 - 499	Hoạt động cần phê duyệt
Đáng kể	100 - 299	Hoạt động chỉ nên duy trì khi không có phương án thay thế
Trung bình	50 - 99	Hoạt động phải được xem xét dựa trên quy chuẩn hiện hành
Thấp	10 - 49	Hoạt động quản lý theo quy trình thông thường

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Điều kiện làm việc

3.1.1. Sử dụng phương tiện bảo vệ cá nhân (PPE)

Kết quả khảo sát (Hình 2) cho thấy tỷ lệ sử dụng phương tiện bảo vệ cá nhân tại cơ sở còn thấp, 31,6% người lao động sử dụng thường xuyên, trong khi dưới 10% sử dụng không thường xuyên. Thực trạng này phổ biến tại các cơ sở tái chế quy mô nhỏ ở các quốc gia đang phát triển, điều kiện vi khí hậu nóng ẩm và hạn chế về quản lý an toàn thường làm giảm mức độ sử dụng PPE, thậm chí ngay cả những nhà máy sản xuất quy mô lớn tỷ lệ số người sử dụng PPE rất thấp, số liệu của Baye, 2022 tỷ lệ này chiếm 34,5% [9]. Trong số các vật dụng PPE, khẩu trang được ưu tiên nhiều nhất (52,6%), cho thấy mối lo ngại về bụi và khí thải, trong khi đó tại công đoạn nấu chảy/đùn nhựa - khu vực có nguy cơ phơi nhiễm khí độc và nhiệt cao thì tỷ lệ sử dụng PPE lại ít hơn, chưa tương xứng trong nhận diện rủi ro giữa các vị trí việc làm. Việc sử dụng PPE thường không đồng đều và phụ thuộc vào kinh nghiệm cá nhân hơn là quy định bắt buộc, nghiên cứu của Khanal, 2021 cho thấy 60% số người được khảo sát sử dụng cả găng tay và khẩu trang tại nơi làm việc, 5% số người được hỏi chỉ sử dụng găng tay khi làm việc [10]. Nhìn chung, mức độ sử dụng đồ bảo hộ lao động còn hạn chế cho thấy nhu cầu cấp thiết phải chuẩn hóa quy định bảo hộ và tăng cường giám sát nhằm giảm thiểu rủi ro sức khỏe nghề nghiệp.



Hình 2. Sử dụng đồ bảo hộ lao động (PPE)

3.1.2. Đào tạo và quản lý an toàn - sức khỏe nghề nghiệp

Phần lớn người lao động được hướng dẫn công việc thông qua quản lý hoặc đồng nghiệp, song các hoạt động đào tạo đều mang tính không chính thức và chưa có sự tham gia của các chương trình huấn luyện chuyên môn. Việc thiếu chính sách an toàn - sức khỏe nghề nghiệp (HSE) cho thấy công tác quản lý vẫn mang tính phản ứng hơn là phòng ngừa. Sau bước nhận diện, đánh giá rủi ro được thực hiện cho từng mối nguy; các mối nguy chính tại cơ sở tái chế nhựa được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 2. Đánh giá rủi ro các mối nguy tại cơ sở tái chế nhựa

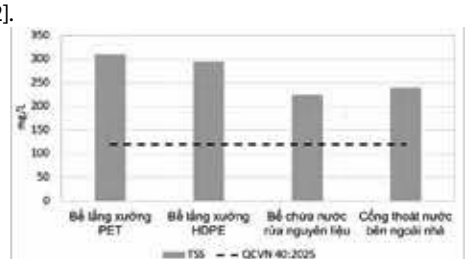
Mối nguy	Hậu quả	Mức độ phơi nhiễm	Xác suất xảy ra	Điểm
Tiếng ồn	Nghiêm trọng; có thể gây khuyết tật vĩnh viễn (15)	Liên tục (10)	Có khả năng xảy ra nhưng hiếm gặp (1)	150
Làm việc với máy móc, thiết bị cơ khí	Nghiêm trọng; có thể gây khuyết tật vĩnh viễn (15)	Liên tục (10)	Có thể xảy ra trong những tình huống bất thường (3)	450
Trượt, vấp ngã	Nhẹ; gây trầy xước, bầm tím hoặc bỏng nhẹ (1)	Liên tục (10)	Khá dễ xảy ra/không phải hiếm (6)	60
Khói, hơi và bụi	Nghiêm trọng; có thể gây khuyết tật vĩnh viễn (15)	Liên tục (10)	Có thể xảy ra trong những tình huống bất thường (3)	450
Phơi nhiễm với vật liệu nguy hại - sinh học	Trung bình; có thể gây thương tật nghiêm trọng nhưng không vĩnh viễn (5)	Thường xuyên (một lần mỗi ngày) (6)	Có thể xảy ra trong những tình huống bất thường (3)	90
Mang vác thủ công	Trung bình; có thể gây thương tật nghiêm trọng nhưng không vĩnh viễn (5)	Thường xuyên (một lần mỗi ngày) (6)	Có thể xảy ra trong những tình huống bất thường (3)	90
Cháy nổ	Thảm họa; có thể gây tử vong (50)	Hiếm khi (1 lần trong 2-4 năm) (1)	Khá dễ xảy ra/không phải hiếm (6)	300
Nhiệt độ khắc nghiệt	Trung bình; có thể gây thương tật nghiêm trọng nhưng không vĩnh viễn (5)	Liên tục hoặc nhiều lần trong ngày (10)	Có thể xảy ra trong những tình huống bất thường (3)	150
Chuyển động lặp lại và tư thế làm việc bất lợi	Nhẹ; gây trầy xước, bầm tím hoặc bỏng nhẹ (1)	Liên tục hoặc nhiều lần trong ngày (10)	Khá dễ xảy ra/không phải hiếm (6)	60

Phần lớn các mối nguy được xác định có điểm rủi ro ở mức tương đối cao, phản ánh sự chưa tương xứng giữa mức độ nguy hiểm và hiệu quả của các biện pháp kiểm soát hiện hành. Hệ thống quản lý an toàn tại cơ sở vẫn còn hạn chế và cần được cải thiện nhằm giảm thiểu các tác động bất lợi đến sức khỏe người lao động cũng như ngăn ngừa sự cố môi trường. Một số mối nguy cần được ưu tiên kiểm soát: (1) hoạt động vận hành máy móc tiềm ẩn nguy cơ chấn thương nghiêm trọng, nhiều thiết bị đã xuống cấp và chưa được trang bị đầy đủ các cơ chế bảo vệ an toàn; (2) phơi nhiễm khói, hơi và bụi được xác định là mối quan ngại đáng kể khi nồng độ PM_{10} và $PM_{2.5}$ ghi nhận tại xưởng HDPE 2 ở mức cao; (3) nguy cơ cháy nổ cũng được đánh giá ở mức cao. Tiếng ồn và nhiệt độ môi trường làm việc được xác định là các yếu tố rủi ro đáng kể, mức ồn tiệm cận hoặc vượt giới hạn cho phép, nhiệt độ vượt ngưỡng khuyến nghị đối với cường độ lao động tương ứng. Việc triển khai các biện pháp kiểm soát đồng bộ là cần thiết nhằm hạn chế khả năng xảy ra tai nạn và giảm thiểu các tác động lâu dài đến sức khỏe nghề nghiệp.

3.2. Chất lượng nước thải

3.2.1. Chất rắn lơ lửng (TSS)

Hình 3 cho thấy nồng độ chất rắn lơ lửng (TSS) trung bình tại cơ sở đạt 268,25 mg/L, cao hơn hơn hai lần so với giới hạn khuyến nghị 120 mg/L. Giá trị này phản ánh tải lượng chất rắn lơ lửng đáng kể phát sinh từ hoạt động rửa và sơ chế nguyên liệu nhựa tái chế. Với đặc thù quy trình tái chế, TSS nhiều khả năng chứa các hạt vi nhựa phát sinh từ quá trình sản xuất. Các hạt lơ lửng kích thước nhỏ tương tự vi nhựa xuất hiện phổ biến trong môi trường và có thể gây suy giảm chức năng hệ sinh thái thủy sinh cũng như tiềm ẩn rủi ro đối với sức khỏe con người [11]. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu tại làng nghề Minh Khai (Hưng Yên), nơi vi nhựa được phát hiện với hàm lượng đáng kể trong nước và trầm tích, cho thấy tái chế nhựa là nguồn phát thải quan trọng vào môi trường [12].

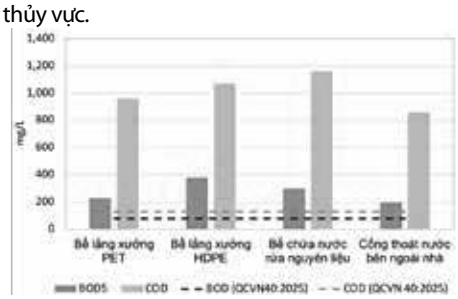


Hình 3. Cặn lơ lửng, TSS

3.2.2. BOD_5 và COD

Hình 4 cho thấy nồng độ COD trung bình đạt 1.005 mg/L, cao hơn gấp 10 lần quy chuẩn (130 mg/L), trong khi BOD_5 đạt 273,6 mg/L, vượt hơn 3 lần so với giới hạn 80 mg/L, tải lượng hữu cơ cao, chủ yếu phát sinh từ công đoạn rửa nguyên liệu chứa dư lượng thực phẩm và chất lỏng trong bao bì nhựa. Nước thải hiện chỉ được xử lý lắng sơ bộ, do đó việc đầu tư công nghệ xử lý sinh học phù hợp, như hệ phản ứng sinh học theo mẻ với vật liệu lọc hạt (SBBGR), có thể cải thiện đáng kể hiệu quả xử lý và giúp nước thải đạt quy chuẩn [13]. Nồng độ COD và BOD_5 thấp nhất được ghi nhận tại cống thoát nước ngoài cơ sở, nhiều khả năng do sự pha loãng với nước thải sinh hoạt.

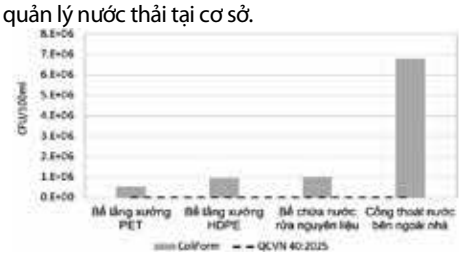
Số liệu của Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Hưng Yên giai đoạn 2016-2020 cho thấy hàm lượng BOD_5 tại phần lớn ao, hồ ở làng nghề Phan Bôi vượt giới hạn cho phép theo QCVN 08-MT:2023/BTNMT. Việc tiếp nhận liên tục nguồn thải ô nhiễm từ các cơ sở tái chế nhựa xen kẽ khu dân cư và các cơ sở dệt may trong khu vực được xem là nguyên nhân chính gây suy giảm chất lượng nước và làm biến đổi các đặc tính lý hóa của thủy vực.



Hình 4. BOD_5 và COD

3.2.3. Coliform

Giá trị trung bình đạt $2,19*10^6$ CFU/100 mL, vượt xa ngưỡng cho phép theo QCVN 40:2025, thể hiện tại Hình 5. Đặc biệt, mẫu thu tại cống thoát nước đô thị ghi nhận nồng độ trung bình $6,8*10^6$ CFU/100 mL cao gấp khoảng 1.360 lần giới hạn cho phép. Coliform cao phản ánh nguy gia tăng khả năng phát sinh các bệnh truyền qua đường nước, đe dọa sức khỏe cộng đồng, việc kiểm soát ô nhiễm vi sinh cần được xem là ưu tiên trong quản lý nước thải tại cơ sở.

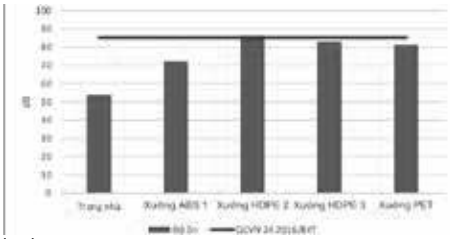


Hình 5. Coliform

3.3. Kết quả đánh giá về không khí

3.3.1. Tiếng ồn

Hình 6 cho thấy mức tiếng ồn tại khu nhà ở trong khuôn viên cơ sở đạt 53,7 dB, nằm trong giới hạn của tất cả các tiêu chuẩn áp dụng, cho thấy mức độ ảnh hưởng đến môi trường sinh hoạt là không đáng kể. Tại các khu vực sản xuất, xưởng ABS 1 ghi nhận mức 72,4 dB, đáp ứng quy chuẩn Việt Nam, nhưng tiệm cận ngưỡng khuyến nghị của WHO (75 dB), do đó có thể có nguy cơ phơi nhiễm khi làm việc kéo dài. Tại Xưởng HDPE 2, mức tiếng ồn đạt 86,6 dB là điểm nóng về tiếng ồn, vượt toàn bộ các tiêu chuẩn so sánh, phản ánh cường độ hoạt động cơ học lớn và khả năng thiếu các biện pháp giảm âm hiệu quả. Mức ồn tại HDPE 3 (82,9 dB) và PET (81,1 dB) tuy chưa vượt ngưỡng của Việt Nam, nhưng đã cao hơn các khuyến nghị của WHO, cho thấy rủi ro tích lũy đối với thính lực và sức khỏe nghề nghiệp. Xu hướng này tương đồng với nghiên cứu của Corlan et al., 2022 trong các cơ sở chế biến gỗ, tiếng ồn trung bình thường nằm dưới quy chuẩn nhưng cục bộ vẫn tiệm cận hoặc vượt giới hạn tại các công đoạn đặc thù [14]. Việc nhiều vị trí đạt mức ồn gần ngưỡng cho phép cho thấy dư địa an toàn hạn chế, cần ưu tiên các biện pháp kiểm soát kỹ thuật như bao che thiết bị, bảo trì máy móc và trang bị bảo vệ thính giác nhằm giảm thiểu tác động lâu dài đến người lao động.

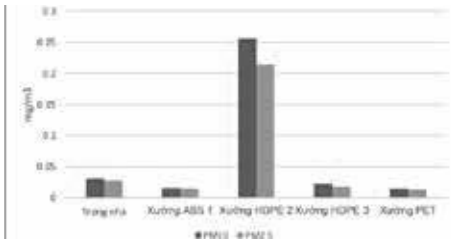


Hình 6. Tiếng ồn

3.3.2. PM_{10} và $PM_{2.5}$

Hình 7 cho thấy PM_{10} tại khu nhà ở, Xưởng ABS 1, Xưởng HDPE 3 và Xưởng PET lần lượt là 31 µg/m^3, 16 µg/m^3, 23 µg/m^3 và 15 µg/m^3, đều thấp hơn ngưỡng nghiêm ngặt 50 µg/m^3 theo tiêu chuẩn của WHO. Giá trị này cũng thấp hơn nhiều so với kết quả nghiên cứu của Guan và cs, nồng độ bụi PM_{10} tại xưởng tái chế nhựa là 0,624mg/m^3 [15]. Xưởng HDPE 2 ghi nhận PM_{10} lên tới 256 µg/m^3, vượt toàn bộ các tiêu chuẩn so sánh. Giá trị này phản ánh mức phát sinh bụi lớn, nhiều khả năng liên quan đến các công đoạn nghiền, gia công cơ học và lưu trữ vật liệu. Đối với môi trường ngoài trời, nồng độ PM_{10} tại sân xưởng đạt 55,2 µg/m^3, vượt ngưỡng 50 µg/m^3 của WHO, song vẫn nằm trong giới hạn theo quy chuẩn Việt Nam.

$PM_{2.5}$ tại khu nhà ở trong khuôn viên cơ sở đạt 28 µg/m^3, đáp ứng quy chuẩn của Việt Nam (65 µg/m^3) nhưng vượt ngưỡng của WHO (25 µg/m^3), cho thấy nguy cơ phơi nhiễm bụi mịn vẫn cần được lưu ý. Tại Xưởng ABS 1, Xưởng HDPE 3 và Xưởng PET, nồng độ $PM_{2.5}$ lần lượt là 15 µg/m^3, 18 µg/m^3 và 13 µg/m^3, đều nằm trong giới hạn cho phép của các tiêu chuẩn so sánh, phản ánh mức độ phát sinh bụi mịn tương đối thấp. Ngược lại, Xưởng HDPE 2 ghi nhận nồng độ $PM_{2.5}$ lên tới 214 µg/m^3, vượt toàn bộ các quy chuẩn áp dụng và cao hơn 3,29 lần so với giới hạn của Việt Nam, giá trị này thấp hơn nhiều so với nghiên cứu của Guan tại xưởng tái chế rác thải nhựa ($PM_{2.5}$ đạt 417 µg/m^3) [15]. Điều đó cho thấy nguồn phát thải bụi mịn đáng kể, nguy cơ gia tăng rủi ro đối với hệ hô hấp của người lao động. Tại sân xưởng, $PM_{2.5}$ đạt 52,8 µg/m^3, đạt quy chuẩn Việt Nam nhưng vượt hầu hết các tiêu chuẩn quốc tế, tương tự như thế đối với khu vực sân dân cư. PM_{10} và $PM_{2.5}$ là thông số ô nhiễm cần ưu tiên kiểm soát, đặc biệt tại Xưởng HDPE 2 tiềm ẩn rủi ro cao đối với sức khỏe và môi trường. Việc tăng cường kiểm soát phát thải tại nguồn kết hợp quan trắc định kỳ là cần thiết nhằm giảm thiểu phơi nhiễm và hạn chế lan truyền bụi mịn ra khu vực lân cận.



Hình 7. Bụi PM10 và PM2.5

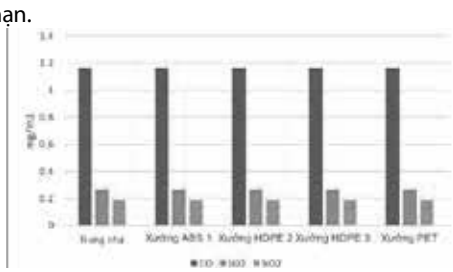
3.3.3. Nhóm khí ô nhiễm

Nitơ dioxit (NO_2)

Nồng độ NO_2 (Hình 8) ghi nhận tại tất cả các vị trí trong cơ sở tái chế đều dưới 0,19 mg/m^3; giá trị này được sử dụng để so sánh nhằm đảm bảo tính thận trọng trong đánh giá, cao hơn nhiều so với chất lượng không khí xung quanh khu vực xử lý rác thải quy mô nhỏ (NO_2 = 0,043 mg/m^3) [16]. Tại khu nhà ở và các xưởng sản xuất nồng độ NO_2 thấp hơn đáng kể so với quy chuẩn không khí trong nhà của Việt Nam (10 mg/m^3) và đáp ứng giới hạn 0,2 mg/m^3 của WHO. Ở môi trường ngoài trời, nồng độ NO_2 tại sân nhà máy và khu dân cư lần lượt đạt 0,023 mg/m^3 và 0,02 mg/m^3, đều nằm trong giới hạn của các tiêu chuẩn quốc tế. Tổng thể, NO_2 chưa được xác định là tác nhân ô nhiễm nổi trội. Tuy nhiên, việc các giá trị trong nhà tiệm cận một số chuẩn quốc tế cho thấy cần duy trì quan trắc định kỳ và xem xét yếu tố này trong các chiến lược kiểm soát phát thải nhằm phòng ngừa rủi ro tiềm ẩn.

Lưu huỳnh dioxit (SO_2)

Ở môi trường trong phân xưởng, nồng độ SO_2 (Hình 8) tại tất cả các vị trí đều dưới 0,27 mg/m^3, thấp hơn đáng kể so với quy chuẩn của Việt Nam (10 mg/m^3). Tuy nhiên, các giá trị này vượt giới hạn của EU (0,125 mg/m^3), WHO (0,02 mg/m^3), cho thấy nguy cơ tiềm ẩn đối với chất lượng môi trường không khí và cần được đánh giá chi tiết hơn. Ở môi trường ngoài trời, nồng độ SO_2 tại sân nhà máy và khu dân cư lần lượt đạt 0,062 mg/m^3 và 0,057 mg/m^3. Môi trường không khí tại cơ sở tái chế tính theo chỉ tiêu SO_2 có chất lượng thấp hơn so với môi trường không khí xung quanh khu vực xử lý chất thải sinh hoạt trong nghiên cứu của Jatau và cs năm 2015 [16]. Xét theo chỉ tiêu SO_2, các mức này đáp ứng quy chuẩn của Việt Nam (0,35 mg/m^3) và EU, nhưng vẫn vượt các ngưỡng nghiêm ngặt của WHO. Vai trò của SO_2 như một tác nhân ô nhiễm chưa thể khẳng định dứt khoát, tuy nhiên việc vượt ngưỡng khuyến nghị của WHO trên phạm vi toàn khu vực cho thấy cần tăng cường quan trắc với độ chính xác cao hơn và tích hợp kiểm soát SO_2 trong các chiến lược giảm thiểu phát thải nhằm phòng ngừa rủi ro dài hạn.



Hình 8. Các khí ô nhiễm

Cacbon monoxit (CO)

Nồng độ CO (Hình 8) ghi nhận tại tất cả các vị trí quan trắc và đều ở mức <1,16 mg/m^3; giá trị này được sử dụng nhằm đảm bảo cách tiếp cận thận trọng trong đánh giá. Tại tất cả các vị trí quan trắc bên trong nhà ở và các xưởng sản xuất nồng độ đo được xấp xỉ mức này, thấp hơn đáng kể so với quy chuẩn QCVN 03:2019/BYT (40 mg/m^3), thấp hơn so với giới hạn của WHO (4 mg/m^3) và EU (23 mg/m^3). Nguy cơ tiềm ẩn liên quan tới tác động của khí CO trong môi trường làm việc của cơ sở là không đáng kể. Kết quả này thấp hơn so với nghiên cứu của Pekdogan và cs, 2024 khi đánh giá chất lượng không khí khu vực tập trung rác

nguyên liệu của cơ sở tái chế rác (2,29 mg/m^3) [17], và nhỏ hơn 10 lần so với nghiên cứu của Jatau và cs, 2015, nồng độ CO ở mức 11ppm, tương đương với 12,61 mg/m^3 [16]. Sự khác nhau đáng kể này có thể liên quan tới điều kiện gió, nhiệt độ tại thời điểm quan trắc và công nghệ tái chế.

4. CÁC GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT

Việc triển khai các giải pháp kiểm soát ô nhiễm cần được thực hiện theo hướng đồng bộ, ưu tiên các nguồn phát thải chính và các nguy cơ ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe người lao động. Các giải pháp đề xuất gồm:

Xây dựng hệ thống xử lý nước thải phù hợp: Cơ sở cần đầu tư hệ thống xử lý nước thải tập trung với công nghệ phù hợp, kết hợp các công đoạn lắng - tách dầu mỡ - xử lý sinh học. Cải thiện quy trình tái sử dụng nước theo hướng tuần hoàn, hạn chế phát sinh nước thải. Giải pháp khả thi là cải tạo hệ thống xử lý hiện hữu bằng cách tích hợp bể lắng, bể xử lý hóa học và thiết bị làm đặc bùn nhằm giảm nồng độ BOD_5, COD, TSS và các chất dinh dưỡng trong nước thải. Keo tụ được xem là phương pháp hóa lý phổ biến, với nhiều lựa chọn chất keo tụ hữu cơ, vô cơ và tự nhiên; tuy nhiên cần thực hiện nghiên cứu khả thi để đánh giá tính bền vững và hiệu quả kinh tế trước khi áp dụng. Một hướng tiếp cận hiệu quả là sử dụng bể tự hoại cải tiến có vách ngăn kết hợp lọc kỵ khí (BAST/BASTAF) và đất ngập nước dòng chảy thẳng đứng cho giai đoạn xử lý sau. Trong dài hạn, các hệ thống phân tán này có thể được mở rộng và liên kết thành hệ thống xử lý tập trung khi điều kiện tài chính và hạ tầng cho phép. Cách tiếp cận này phù hợp với định hướng quy hoạch hạ tầng theo mô hình phân tán cho các làng nghề, trong bối cảnh các hệ thống xử lý tập trung thường không khả thi về mặt kinh tế.

Trang bị đầy đủ phương tiện bảo hộ lao động: Cơ sở cần cung cấp đầy đủ khẩu trang chuyên dụng, găng tay chịu nhiệt, kính bảo hộ, nút tai chống ồn và quần áo bảo hộ phù hợp với từng vị trí công việc. Quan trọng hơn, cần thiết lập cơ chế giám sát việc sử dụng đồ bảo hộ lao động nhằm chuyển từ khuyến nghị sang yêu cầu bắt buộc, qua đó giảm nguy cơ phơi nhiễm nghề nghiệp và các bệnh liên quan đến hô hấp, da liễu hoặc suy giảm thính lực.

Tăng cường tập huấn an toàn và sức khỏe nghề nghiệp: Cơ sở cần xây dựng chương trình đào tạo định kỳ về an toàn máy móc, phòng cháy chữa cháy, nhận diện rủi ro hóa chất và quy trình ứng phó sự cố. Việc chuẩn hóa quy trình vận hành an toàn không chỉ giúp giảm tai nạn lao động mà còn nâng cao nhận thức môi trường của công nhân, góp phần hình thành văn hóa sản xuất an toàn và bền vững.

Tăng cường diện tích cây xanh và hạ tầng sinh thái trong khuôn viên: Phát triển dải cây xanh bao quanh nhà xưởng đóng vai trò như một "hàng rào sinh học", giúp hấp thụ bụi, giảm phát tán chất ô nhiễm và suy giảm cường độ tiếng ồn. Bên cạnh đó, cần kết hợp thông gió tự nhiên, cải thiện bố trí mặt bằng và tách biệt khu sản xuất với khu sinh hoạt nhằm nâng cao chất lượng môi trường không khí tổng thể.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá hiện trạng môi trường tại một cơ sở tái chế nhựa điển hình thuộc làng nghề Phan Bôi (Hưng Yên), cho thấy hoạt động sản xuất xen kẽ khu dân cư, công nghệ sản xuất còn lạc hậu và hạ tầng bảo vệ môi trường chưa hoàn thiện là các nguyên nhân chính làm gia tăng nguy cơ ô nhiễm môi trường. Nhiều thông số nước thải như COD, BOD_5, TSS và Coliform vượt quy chuẩn cho phép, phản ánh tải lượng ô nhiễm hữu cơ cao và tiềm ẩn rủi ro đối với nguồn tiếp nhận cũng như sức khỏe cộng đồng. Môi trường lao động cũng ghi nhận các yếu tố nguy hại đáng kể như bụi mịn, khí thải từ quá trình gia nhiệt nhựa, tiếng ồn lớn, nhiệt độ cao và rủi ro từ máy móc, có thể ảnh hưởng tiêu cực đến sức khỏe nghề nghiệp của người lao động.

Nghiên cứu kiến nghị các cơ sở tái chế cần đầu tư hệ thống xử lý nước thải đạt quy chuẩn trước khi xả thải; tăng cường trang bị phương tiện bảo hộ và đào tạo an toàn lao động; áp dụng các giải pháp kỹ thuật nhằm kiểm soát bụi, khí thải và tiếng ồn; bố trí dải cây xanh cách ly để hạn chế lan truyền ô nhiễm, các giải pháp trên cần được triển khai theo cách tiếp cận quản lý môi trường tích hợp, trong đó đầu tư công nghệ phải song hành với cải thiện quản trị an toàn và nâng cao nhận thức người lao động. Về lâu dài, cần đẩy mạnh quy hoạch khu sản xuất tách biệt khu dân cư, đổi mới công nghệ theo hướng sạch hơn và tăng cường giám sát môi trường định kỳ nhằm nâng cao chất lượng môi trường và hướng tới phát triển làng nghề bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1] Bộ Công thương. Báo cáo tổng hợp: Khảo sát, phân tích, đánh giá thực trạng trong nước, kinh nghiệm quốc tế và định hướng phát triển công nghiệp tái chế Việt Nam. Hà Nội, 2017.

[2] Neo E.R.K., Soo G.C.Y., Tan D.Z.L. et al. Life cycle assessment of plastic waste end-of-life for India and Indonesia. Resources, Conservation and Recycling, no. 174, 105774, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105774.

[3] Zhao X., Toshihide T., Hiroyuki D. Evaluating the Effects of Air Pollution from a Plastic Recycling Facility on the Health of Nearby Residents. Acta Medica Okayama, no. 71(3), pp. 209-217, 2017, doi: 10.18926/AMO/55284.

[4] Takashi Y., Miyuki N., Toshihide T. et al. Does Open-air Exposure to Volatile Organic Compounds near a Plastic Recycling Factory Cause Health Effects? Journal of Occupational Health, no. 54(1), pp. 79-87, 2012, doi: 10.1539/joh.11-0182-OA.

[5] Fuller J., White D., Yi H. et al. Analysis of volatile compounds causing undesirable odors in a polypropylene-high-density polyethylene recycled plastic resin with solid-phase microextraction. Chemosphere, no. 260, 127589, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127589.

[6] Croxatto Vega G., Gross A., Birkved M. The impacts of plastic products on air pollution: A simulation study for advanced life cycle inventories of plastics covering secondary microplastic production. Sustainable Production and Consumption, no. 28, pp. 848-865, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.07.024.

[7] Sở Tài nguyên và Môi trường Hưng Yên. Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Hưng Yên giai đoạn 2016-2020. Hưng Yên, 2021.

[8] Technical Team. Activity risk assessment. OHS SEH College, 2018.

[9] Baye B.F., Baye M.F., Teym A. et al. Utilization of Personal Protective Equipment and Its Associated Factors Among Large Scale Factory Workers in Debre Berhan Town, Ethiopia. Environmental Health Insights, no. 16, 11786302221102324, 2022, doi: 10.1177/11786302221102324.

[10] Khanal A., Sondhi A., Giri S. Use of personal protective equipment among waste workers of Sisdol landfill site of Nepal. International Journal of Occupational Safety and Health, no. 11(3), pp. 158-164, 2021, doi: 10.3126/ijosh.v11i3.39733.

[11] Gerdes Z., Hermann M., Ogonowski M. et al. A novel method for assessing microplastic effect in suspension through mixing test and reference materials. Scientific Reports, no. 9(1), 10695, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-47160-1.

[12] Minh Hen P., Manh Hoang N., Huu Thinh D. et al. Microplastic Production from Plastic Recycling Village in Van Lam, Hung Yen Province. Environmental Engineering Science, no. 38(2), 2022.

[13] Altieri V.G., De Sanctis M., Sgherza D. et al. Treating and reusing wastewater generated by the washing operations in the non-hazardous plastic solid waste recycling process: Advanced method vs. conventional method. Journal of Environmental Management, no. 284, 112011, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112011.

[14] Corlan R.V., Ionel I., Boatca M.E. et al. Indoor air quality research within a furniture factory. Journal of Physics: Conference Series, no. 2212(1), 012004, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2212/1/012004.

[15] Guan J., Dai Z., Wang R. et al. Pollution characteristics and control strategies of typical waste plastic recycling plants. Journal of Environmental Chemical Engineering, no. 13(3), 116398, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.116398.

[16] Jatau S.S., Raimi M.O., Kakwi J.D. et al. Assessing Air Quality at Waste Dump Site of Plateau State University, Bokkos, Nigeria: Evaluating Socio-Economic and Health Implications for the Community. Authorea, 2024. Truy cập tại Authorea, truy cập ngày 23/02/2026.

[17] Pekdogan T., Yildizhan H., Ameen A. Unveiling the Air Quality Impacts of Municipal Solid Waste Disposal: An Integrative Study of On-Site Measurements and Community Perceptions. Atmosphere, no. 15(4), 410, 2024, doi: 10.3390/atmos15040410.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 15/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Xây dựng bản đồ chất lượng nước nhằm đánh giá sự biến đổi theo không gian và thời gian của một số sông cấp nước chính cho khu vực đô thị TP Hải Phòng

Water quality mapping using water quality index to assess the temporal and spatial variations of water quality at some major water intake points supplying water for Hai Phong city

> TS NGUYỄN LAN HƯƠNG*, TS PHẠM DUY ĐÔNG, GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA
Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: huongnl2@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Ba con sông Rế, Đa Độ và Giá đóng vai trò chủ yếu trong việc cung cấp nước sinh hoạt cho khu vực nội thành TP Hải Phòng. Tuy nhiên, quá trình đô thị hóa, phát triển kinh tế và biến đổi khí hậu đang làm suy giảm chất lượng nguồn nước. Nghiên cứu này nhằm đánh giá sự biến đổi theo không gian và thời gian của các thông số chất lượng nước thô cấp cho các nhà máy nước tại TP Hải Phòng thông qua phương pháp đánh giá chỉ số chất lượng nước (WQI) kết hợp với bản đồ GIS. Kết quả cho thấy chất lượng nước thô của ba con sông có sự khác biệt rõ rệt. Sông Rế có chất lượng thấp nhất (WQI ở mức trung bình-tốt), xuất hiện tình trạng ô nhiễm vi sinh và hàm lượng nitơ vượt quy chuẩn tại nhiều thời điểm. Sông Đa Độ có chất lượng tốt hơn (WQI ở mức tốt-rất tốt), tuy nhiên vẫn ghi nhận dấu hiệu ô nhiễm vi sinh và dinh dưỡng, đặc biệt trong mùa mưa. Trong khi đó, điểm lấy nước của Nhà máy nước Ngũ Lão trên sông Giá, thuộc khu vực phía Bắc thành phố, có chất lượng tốt nhất; hầu hết các thông số đều đạt quy chuẩn và ít chịu tác động ô nhiễm. Nghiên cứu cũng cho thấy tầm quan trọng của việc kiểm soát ô nhiễm nguồn nước, đặc biệt tại lưu vực sông Rế và sông Đa Độ, nhằm đảm bảo tính bền vững và an toàn cho hệ thống cấp nước của TP Hải Phòng.

Từ khóa: Bản đồ chất lượng nước; chỉ số chất lượng nước (WQI); kiểm soát ô nhiễm nguồn nước.

ABSTRACT

The Re, Da Do, and Gia rivers play a key role in supplying domestic water for the urban area of Hai Phong city. However, rapid urbanization, economic development, and climate change have led to a decline in water quality. This study aims to assess the temporal and spatial variations in raw water quality parameters supplying water treatment plants in Hải Phòng using the Water Quality Index (WQI) method combined with GIS-based mapping. The results indicate significant differences in water quality among the three rivers. The Re River has the lowest water quality (WQI ranging from medium to good), with frequent exceedances of microbiological and nitrogen-related parameters. The Da Do River has better water quality (WQI ranging from good to very good) but still shows signs of microbiological and nutrient pollution, particularly during the rainy season. In contrast, the water intake point for Ngu Lao Water Plant (on the Gia River), located in the northern part of the city, exhibits the best water quality, with most parameters meeting regulatory standards and experiencing minimal pollution impacts. These findings highlight the need for enhanced pollution control and watershed management, particularly in the Re and Da Do river basins, to ensure the sustainability and safety of water supply systems in Hai Phong.

Keywords: Water quality mapping; water quality index; water pollution control.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo quy hoạch cấp nước của TP Hải Phòng đến năm 2030, hệ thống cấp nước nội thị Hải Phòng sử dụng chủ yếu là nguồn nước mặt từ các sông Rế, sông Đa Độ, sông Vật Cách... Tuy nhiên những năm gần đây, do sự phát triển của thành phố và ảnh hưởng của quá trình đô thị hóa, chất lượng nước của các con sông này có xu hướng suy giảm. Ngoài các yếu tố nước thải, chất thải từ đô thị, công

nghiệp và nông nghiệp, nước mặt Hải Phòng còn đứng trước nguy cơ bị nhiễm mặn do biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

Ba con sông Giá, Rế và Đa Độ đều là các tuyến kênh trục chính trong hệ thống thủy lợi tại Hải Phòng, giữ vai trò quan trọng trong tưới tiêu nông nghiệp, cung cấp nước thô, phòng chống thiên tai và bảo vệ hệ sinh thái. Sông Giá dài 16,5 km, nhận nước từ nhiều nguồn và đảm nhiệm đa chức năng. Sông Rế dài 11,6 km, ngoài các chức năng tương tự còn đang bị ô nhiễm nghiêm trọng với nhiều chỉ tiêu vượt mức cho phép và chịu tác động của biến đổi khí hậu. Trong khi đó, sông Đa Độ dài 48,6 km có chất lượng nước tương đối ổn định nhưng cũng tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm gia tăng, đặc biệt vào mùa mưa [1].

Chỉ số chất lượng nước (WQI) được sử dụng rộng rãi để đánh giá chất lượng nước ngầm và nước mặt, đặc biệt về mức độ phù hợp cho tưới tiêu và cấp nước sinh hoạt [2], [3]. Có nhiều phương pháp khác nhau để tính toán WQI tùy theo mục đích sử dụng cụ thể [4]. Kết quả nghiên cứu của Lê Thị Hồng Vân và cộng sự sử dụng chỉ số chất lượng nước của Việt Nam (VN_WQI) để tính toán, đánh giá chất lượng nước và đề xuất các giải pháp bảo vệ nguồn nước mặt trên địa bàn TP Hải Phòng cho thấy chất lượng nước tại một số quận nội thành thấp hơn ngoại thành và chất lượng nước của các kênh, hồ thấp hơn rất nhiều so với chất lượng nước của các sông, đặc biệt là 6 sông cấp cho mục đích sinh hoạt [5]. Ngoài ra, một số nghiên cứu còn kết hợp hệ thống thông tin địa lý (GIS) nhằm thể hiện dữ liệu WQI một cách trực quan và hiệu quả hơn [6-8].

Nghiên cứu này đánh giá sự thay đổi chất lượng nước của các nguồn cung cấp nước chính cho 5 trạm cấp nước của Công ty CP Cấp nước Hải Phòng cấp cho khu vực nội thị bao gồm các nhà máy nước: An Dương, Vật Cách, Ngũ Lão, Cầu Nguyệt và Hưng Đạo. Chỉ số chất lượng nước WQI được đánh giá trung bình theo năm và kết quả được thể hiện trên bản đồ chất lượng nước để đánh giá sự ảnh hưởng theo không gian và thời gian.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thu thập số liệu

Số liệu được thu thập tại Công ty CP cấp nước Hải Phòng từ kết quả đo chất lượng nguồn nước thô hằng ngày trong vòng 3 năm từ 2021 đến 2023 tại vị trí công trình thu nước của 5 nhà máy nước với tổng công suất thiết kế là 335.000 m^3/ngày chiếm 85,9% tổng công suất thiết kế của các trạm cấp nước được vận hành bởi công ty (Bảng 1). Các chỉ tiêu chất lượng nước thu thập bao gồm pH, độ đục, COD, ni tơ amoni (NH_4-N), nitrit (NO_2-N), nitrat (NO_3-N) và coliform, nhằm phản ánh đặc trưng ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh của nguồn nước cấp cũng như tính toán chỉ số VN_WQI. Tần suất quan trắc các chỉ số là hằng ngày đối với các thông số pH, độ đục, COD, ni tơ amoni (NH_4-N); tần suất quan trắc 2 lần/tuần đối với các thông số Coliform, nitrat, nitrit. Một số thông số như TP (tổng photpho) hoặc DO (oxy hòa tan) không được lựa chọn do không phải là các chỉ tiêu được theo dõi thường xuyên trong chương trình quan trắc của hệ thống cấp nước và có mức độ liên quan thấp hơn đến rủi ro sức khỏe trực tiếp đối với người sử dụng nước. Bản đồ vị trí lấy mẫu tương ứng với các trạm bơm nước thô được thể hiện ở Hình 1.

Bảng 1. Công suất thiết kế, nguồn nước và vùng phục vụ cấp nước của các nhà máy nước trong phạm vi nghiên cứu

TT	Nhà máy nước	Công suất TK (m^3/ngày)	Nguồn nước	Vùng phục vụ cấp nước *(địa danh trước khi sáp nhập)*
1	An Dương	200.000	Sông Rế	Quận Hồng Bàng, Lê Chân, Ngô Quyền, Hải An và khu vực đảo Cát Hải
2	Cầu Nguyệt	40.000	Sông Đa Độ	Quận Kiến An, huyện An Lão, An Dương
3	Hưng Đạo	50.000		Quận Dương Kinh, Đồ Sơn
4	Ngũ Lão	25.000	Sông Giá	Huyện Thủy Nguyên và cấp hỗ trợ về khu vực Trung tâm
5	Vật Cách	20.000	Kênh Tân Hưng Hồng	Quận Hồng Bàng và huyện An Dương

Hình 1. Vị trí các trạm cấp nước và phạm vi cấp nước đô thị trong khu vực nghiên cứu

2.2. Xử lý số liệu và tính toán chỉ số chất lượng nước

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp thống kê mô tả để mô tả các thông số về chất lượng nước mặt và các số liệu khảo sát tại vùng nghiên cứu như giá trị trung bình theo mùa của các thông số chất lượng nước. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (QCVN 08:2023/BTNMT) được sử dụng để so sánh và đối chiếu với giá trị quan trắc chất lượng nước mặt theo ngày trong 3 năm từ 2021 đến 2023.

Nhằm mô tả định lượng về chất lượng nước, nghiên cứu sử dụng chỉ số chất lượng nước của Việt Nam (VN_WQI) được hướng dẫn trong Quyết định số 1460/QĐ-TCMT ngày 12/11/2019 của Tổng cục Môi trường về việc ban hành Hướng dẫn kỹ thuật tính toán và công bố chỉ số chất lượng nước Việt Nam [9]. Để đánh giá sự biến đổi theo không gian thể hiện trên bản đồ, nghiên cứu đánh giá thông qua việc tính toán các chỉ số WQI tại 5 vị trí quan trắc của Công ty CP Cấp nước Hải Phòng.

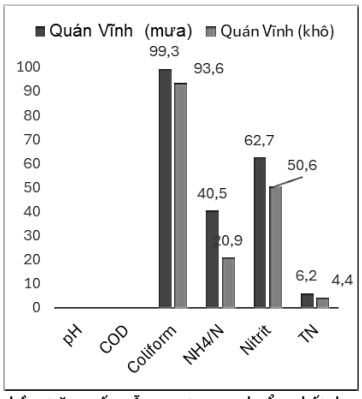
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Chất lượng nước theo nguồn nước sông

3.1.1. Sông Rế (Nhà máy nước An Dương)

Kết quả quan trắc cho nước sông Rế tại vị trí trạm bơm nước thô Quán Vĩnh cho thấy giá trị pH trung bình theo mùa dao động trong 7,37-7,47. Giá trị này nằm trong khoảng trung tính, tương đối ổn định, ít biến động giữa các mùa và nằm trong khoảng giới hạn nguồn loại A theo QCVN 08:2023/BTNMT (Hình 2). Trong khi đó, độ đục có xu hướng cao hơn vào mùa mưa (khoảng 18-19 NTU) so với mùa khô (13-16 NTU), cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của dòng chảy mặt và bùn cát vào mùa mưa. Các chỉ tiêu phản ánh ô nhiễm hữu cơ như COD cũng có xu hướng cao hơn vào mùa mưa (3.85-4.49 mg/L) và giảm vào mùa khô (2.64-2.99 mg/L), cho thấy lượng chất hữu cơ bị cuốn trôi vào nguồn nước trong mùa mưa. Tương tự, ni tơ amoni (NH_4-N) có giá trị cao hơn vào mùa mưa và giảm dần qua các năm, cho thấy dấu hiệu cải thiện nhẹ về ô nhiễm dinh dưỡng. Đối với

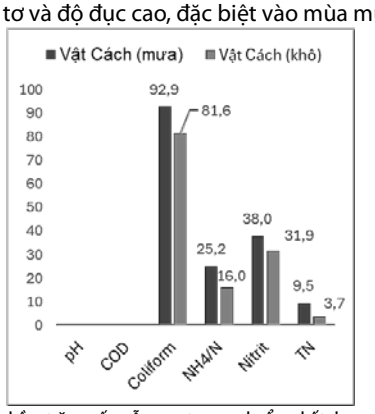
nitrat và nitrit, giá trị dao động không lớn qua các năm, tuy nhiên nitrat có xu hướng tăng nhẹ vào mùa khô năm 2023. Chỉ tiêu Coliform luôn ở mức cao, đặc biệt vào mùa mưa (lên đến ~4600 MPN/100 mL năm 2021), phản ánh khả năng ô nhiễm vi sinh từ nước thải sinh hoạt hoặc chăn nuôi. So sánh với QCVN 08:2023/BTNMT loại A cho thấy một số thông số có tỷ lệ vượt quy chuẩn tương đối cao, điển hình như Coliform (99,3% số mẫu vượt quy chuẩn vào mùa mưa), các chỉ tiêu ni tơ amoni (NH_4-N), Nitrit có tỉ lệ mẫu vượt quy chuẩn cao, phản ánh tình trạng ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng tại khu vực này.



Hình 2. Tỷ lệ phần trăm số mẫu vượt quy chuẩn chất lượng nước theo QCVN 08:2023/BTNMT loại A của sông Rế *(Trạm bơm Quán Vĩnh)*

3.1.2. Kênh Tân Hưng Hồng (Nhà máy nước Vật Cách)

Kênh Tân Hưng Hồng nằm trong lưu vực sông Rế, thuộc hệ thống kênh thủy lợi An Kim Hải. Ngoài là nguồn cung cấp nước thô, hệ thống kênh này có nguy cơ tiếp nhận nước thải dân cư và nông nghiệp tại một số thời điểm. Kết quả quan trắc chất lượng nước tại điểm lấy nước thô vào Nhà máy nước Vật Cách giai đoạn 2021 - 2023 cho thấy có nhiều thời điểm các thông số chất lượng nước vượt Quy chuẩn QCVN 08:2023/BTNMT - loại A (Hình 3). Chỉ có 2 thông số là pH và COD tại nhiều thời điểm nằm trong khoảng giá trị cho phép đối với nguồn nước cấp cho sinh hoạt (giá trị pH trung bình dao động trong khoảng 7,41-7,49, hàm lượng trung bình COD (2,83-4,50 mg/L). Tuy nhiên chỉ tiêu Coliform có giá trị trung bình theo mùa tương đối cao (1870-2949 MPN/100 mL), và đa số thời điểm là vượt tiêu chuẩn (92,9% số mẫu vượt tiêu chuẩn vào mùa mưa và 81,6% số mẫu vượt tiêu chuẩn vào mùa khô). Ngoài ra, độ đục tăng đột biến trong năm 2023 (lên đến 55-60 NTU), cho thấy sự gia tăng đáng kể của chất rắn lơ lửng, có thể liên quan đến biến động thủy văn hoặc hoạt động khai thác gây xáo trộn dòng chảy. Từ số liệu quan trắc cho thấy chất lượng nước thô của NMN Vật Cách chỉ đáp ứng một phần quy chuẩn loại A, với các vấn đề nổi bật là ô nhiễm vi sinh, các hợp chất ni tơ và độ đục cao, đặc biệt vào mùa mưa.

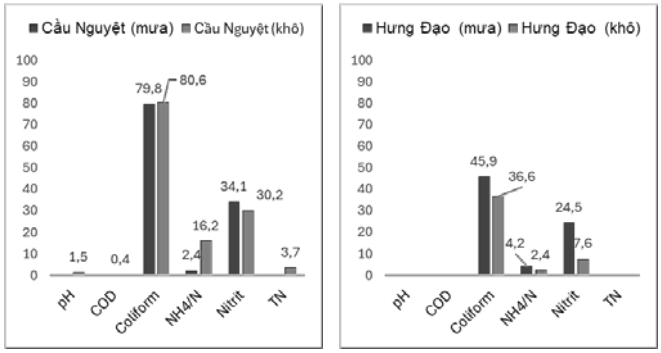


Hình 3. Tỷ lệ phần trăm số mẫu vượt quy chuẩn chất lượng nước theo QCVN 08:2023/BTNMT loại A của Kênh Tân Hưng Hồng (Nhà máy Nước Vật Cách)

3.1.3. Sông Đa Độ (Nhà máy nước Cầu Nguyệt và Hưng Đạo)

Số liệu quan trắc cho thấy chất lượng nước sông Đa Độ (Nhà máy nước Cầu Nguyệt) trong giai đoạn 2021-2023 có sự biến động theo mùa và nhìn chung khá ổn định qua các năm. Giá trị pH trung bình dao động trong khoảng 7,45-7,60, nằm trong khoảng trung tính và tại hầu hết cả thời điểm đều nằm trong khoảng giới hạn nguồn loại A theo QCVN 08:2023/BTNMT. COD trung bình mùa dao động từ 2,17-2,87 mg/L và có xu hướng cao hơn vào mùa mưa, tại một số thời điểm thông số này vượt QCVN nhưng không đáng kể. Amoni (NH_4-N) có giá trị trung bình theo mùa duy trì ở mức thấp (0,10-0,11 mgN/L) và khá ổn định qua các năm, và tại một số thời điểm có vượt quy chuẩn cho thấy mức độ ô nhiễm dinh dưỡng không lớn. Đối với nitrit**,** các giá trị biến động không đáng kể, có xu hướng tăng vào mùa khô năm 2023 (0,86 mgN/L đối với Nitrit), tỷ lệ số mẫu vượt tiêu chuẩn cao hơn đối với chỉ tiêu Nitrit chủ yếu vào mùa mưa (Hình 4-a). Chỉ tiêu Coliform ở mức tương đối cao và biến động theo mùa và tỷ lệ số mẫu vượt quy chuẩn rất cao (79,8% vào mùa mưa và 80,6% vào mùa khô) phản ánh ảnh hưởng của nguồn thải sinh hoạt hoặc nông nghiệp chưa được kiểm soát xả vào lưu vực. Chất lượng nước sông Đa Độ tại khu vực nhà máy nước Cầu Nguyệt cơ bản đáp ứng quy chuẩn loại A, với mức độ ô nhiễm không lớn ngoại trừ thông số vi sinh thường xuyên vượt tiêu chuẩn.

Mặt khác, kết quả quan trắc chất lượng nước sông Đa Độ tại khu vực Nhà máy nước Hưng Đạo giai đoạn 2021 - 2023 cho thấy các thông số cơ bản đáp ứng khá tốt quy chuẩn (QCVN 08:2023/BTNMT - loại A). Giá trị pH dao động trong khoảng 7,42-7,51, nằm trong giới hạn cho phép. Hàm lượng các chất hữu cơ, thể hiện qua COD (2,07-2,77 mg/L), cũng như các dạng dinh dưỡng như ni tơ amoni (0,10-0,15 mgN/L) và nitrat (0,71-0,77 mgN/L) đều thấp, cho thấy mức độ ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng không đáng kể. Nồng độ nitrit nhìn chung đạt quy chuẩn, mặc dù tại một số thời điểm có xu hướng tiệm cận giới hạn cho phép (0,05 mg/L). Đối với chỉ tiêu vi sinh, hàm lượng Coliform phần lớn nằm trong giới hạn cho phép (≤ 1.000 MPN/100 mL), tuy nhiên ghi nhận một số thời điểm (45,9% trên tổng số mẫu) vượt nhẹ vào mùa mưa, phản ánh nguy cơ ô nhiễm vi sinh cục bộ. Các thông số như độ đục và COD có xu hướng gia tăng vào mùa mưa (Hình 4-b). Kết quả cho thấy chất lượng nước thô cấp cho nhà máy nước Hưng Đạo tương đối tốt hơn so với Nhà máy nước Cầu Nguyệt và phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt sau xử lý, tuy nhiên vẫn cần tăng cường giám sát, đặc biệt đối với các chỉ tiêu vi sinh và trong điều kiện mùa mưa.



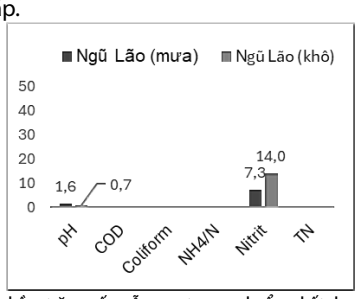
(a) *(b)*

Hình 4. Tỷ lệ phần trăm số mẫu vượt quy chuẩn chất lượng nước theo QCVN 08:2023/BTNMT loại A của sông Đa Độ (Nhà máy nước Cầu Nguyệt -a và Nhà máy nước Hưng Đạo - b)

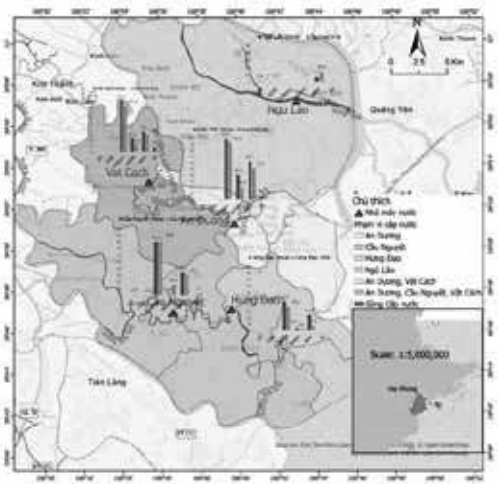
3.1.4. Sông Giá (Nhà máy nước Ngũ Lão)

Kết quả quan trắc chất lượng nước sông Giá tại khu vực Nhà máy nước Ngũ Lão giai đoạn 2021 - 2023 cho thấy các thông số đều đáp

ứng tốt quy chuẩn (QCVN 08:2023/BTNMT - loại A). Giá trị pH dao động trong khoảng 7,69-7,98, nằm trong giới hạn cho phép (6-8,5). Hàm lượng chất hữu cơ COD (2,38-3,74 mg/L), luôn thấp hơn nhiều so với ngưỡng quy chuẩn (≤ 10 mg/L). Các dạng dinh dưỡng như ni tơ amoni (0,07-0,10 mgN/L), nitrat (0,61-0,74 mg/L) và nitrit (0,02-0,03 mgN/L) đều thấp, trong đó chỉ tiêu nitơ amoni và nitrit nằm trong giới hạn cho phép, phản ánh nguy cơ ô nhiễm dinh dưỡng thấp. Đặc biệt, chỉ tiêu vi sinh Coliform dao động trong khoảng 115,87-225,58 MPN/100 mL, thấp hơn rất nhiều so với giới hạn quy chuẩn (≤ 1000 MPN/100 mL), cho thấy mức độ ô nhiễm vi sinh không đáng kể (Hình 5). Chất lượng nước sông Giá tại điểm lấy nước thô tốt và ổn định hơn so với nhiều khu vực khác, hoàn toàn phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt sau xử lý đơn giản và ít chịu tác động của các nguồn ô nhiễm. Điều này cũng được thể hiện rõ qua Hình 5 với tỷ lệ mẫu vượt quy chuẩn rất thấp hoặc gần như bằng 0 đối với hầu hết các chỉ tiêu. Các thông số như pH, COD, ni tơ amoni (NH_4-N) và nitrit (NO_2^-) không ghi nhận hoặc ghi nhận không đáng kể số mẫu vượt quy chuẩn, phản ánh mức độ ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng thấp.



Hình 5. Tỷ lệ phần trăm số mẫu vượt quy chuẩn chất lượng nước theo QCVN 08:2023/BTNMT loại A của sông Giá (Nhà máy nước Ngũ Lão)

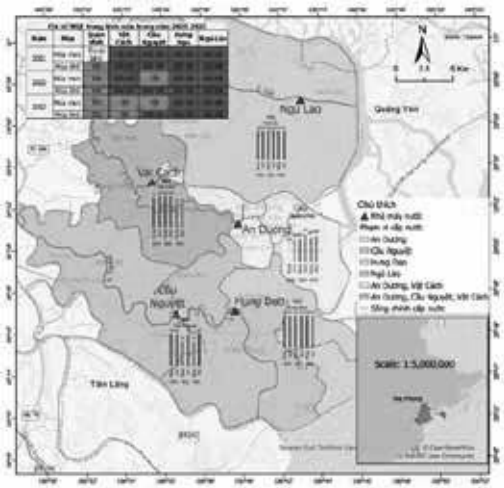


Hình 6. Bản đồ thông số chất lượng nước thể hiện tỉ lệ phần trăm số mẫu vượt tiêu chuẩn QCVN 08:2023/BTNMT loại A đối với một số chỉ số chất lượng nước

Hình 6 thể hiện sự phân bố không gian của tỷ lệ (%) số mẫu nước vượt tiêu chuẩn QCVN 08:2023/BTNMT - loại A đối với các chỉ tiêu chất lượng nước tại khu vực nghiên cứu. Một số chỉ tiêu như COD, nitơ amoni (NH_4-N) có tỷ lệ vượt chuẩn khá cao tại nhiều điểm, đặc biệt tập trung ở các khu vực như An Dương, Cầu Nguyệt - Hưng Đạo. Trong khi đó, các chỉ tiêu như pH có tỷ lệ vượt chuẩn thấp hoặc không đáng kể ở hầu hết các vị trí. Không gian phân bố cho thấy các khu vực phát triển, tập trung dân cư lớn chịu ảnh hưởng của hoạt động đô thị, công nghiệp và nông nghiệp có xu hướng ghi nhận tỷ lệ vượt chuẩn cao hơn, điển hình là vùng trung tâm, lưu vực sông Rế. Ngược lại, một số khu vực có mật độ dân số thấp hơn như lưu vực sông Giá chất lượng nước tốt hơn.

3.2. Chỉ số chất lượng nước WQI

Kết quả đánh giá chỉ số chất lượng nước (WQI) trung bình theo mùa tại các khu vực nghiên cứu (Bảng 2) cho thấy chất lượng nước nhìn chung dao động từ mức khá đến rất tốt, tuy nhiên có sự khác biệt rõ rệt giữa các vị trí và theo mùa. Cụ thể, khu vực Ngũ Lão và Hưng Đạo duy trì giá trị WQI ở mức rất cao (≈100) trong hầu hết các thời điểm, phản ánh chất lượng nước tốt, ít chịu tác động của nguồn thải. Tương tự, Vật Cách cũng có WQI cao (≈88-100), mặc dù có sự suy giảm nhẹ trong năm 2023. Trong khi đó, khu vực Cầu Nguyệt có sự biến động rõ hơn, với WQI giảm xuống khoảng 88 vào mùa mưa các năm 2022 - 2023. Đáng chú ý, Quán Vĩnh (sông Rế) là khu vực có WQI thấp nhất trong số các vị trí lấy nước, dao động từ khoảng 74-86, tương ứng với mức trung bình đến khá, phản ánh mức độ ô nhiễm cao hơn so với các khu vực còn lại. Xét theo yếu tố mùa, WQI có xu hướng thấp hơn vào mùa mưa so với mùa khô tại hầu hết các vị trí. Tuy nhiên, một số khu vực như Ngũ Lão và Hưng Đạo vẫn duy trì chất lượng nước ổn định giữa hai mùa.



Hình 7. Bản đồ chỉ số chất lượng nước WQI trung bình theo mùa của nước thô

Hình 7 thể hiện sự phân bố không gian của chỉ số chất lượng nước (WQI) trung bình theo mùa đối với nguồn nước thô tại khu vực nghiên cứu. Bản đồ chỉ số chất lượng nước WQI cho thấy sự khác nhau về không gian của chỉ tiêu chất lượng nước. Trong đó đáng chú ý là nguồn nước thô cấp cho nhà máy nước An Dương có chỉ số chất lượng nước thấp nhất. Đây là nguồn cấp nước quan trọng cho khu vực nội thị của Hải Phòng, chiếm khoảng 51,3% tổng công suất cấp nước của công ty, tuy nhiên chất lượng nước thô chỉ đạt ở mức trung bình đến tốt.

4. KẾT LUẬN

Chất lượng nguồn nước thô của 3 con sông cấp nước chính cho các nhà máy nước của TP Hải Phòng là Giá, Rế và Đa Độ có sự chênh lệch rõ rệt. Sông Rế có chỉ số WQI thấp nhất, tuy vẫn được đánh giá ở mức Tốt và Trung Bình (trạm bơm Quán Vĩnh) cấp nước thô cho NMN An Dương - phù hợp với mục đích cấp nước sinh hoạt, tuy nhiên cần phải có các biện pháp xử lý phù hợp. Tại điểm lấy nước thô cho Nhà máy nước Vật Cách cũng thuộc lưu vực sông Rế có chỉ số chất lượng nước tốt hơn nhưng có dấu hiệu suy giảm gần đây. Các thông số quan trắc tại 2 điểm lấy nước thô từ sông Rế đáng chú ý là thông số vi sinh cao vượt quy chuẩn ở hầu hết các thời điểm, bên cạnh đó chỉ tiêu ni tơ cũng có nhiều thời điểm vượt quy chuẩn. Điều này cho thấy mức độ ô nhiễm vi sinh và chất dinh dưỡng là đáng kể ở các năm gần đây, có thể do việc kiểm soát chưa tốt các nguồn thải từ lưu vực do tập trung đông các cơ sở sản xuất công nghiệp, nông nghiệp và khu dân cư.

Bảng 2. Chỉ số WQI trung bình mùa trong năm 2021 – 2023

Năm	Mùa	Quán Vĩnh	Vật Cách	Cầu Nguyệt	Hưng Đạo	Ngũ Lão
2021	Mưa	74,2	97,7	100,0	100,0	100,0
	Khô	79,4	100,0	100,0	99,4	100,0
2022	Mưa	79,8	99,9	88,0	100,0	100,0
	Khô	86,8	100,0	100,0	100,0	100,0
2023	Mưa	82,9	88,0	88,0	100,0	100,0
	Khô	84,4	88,0	100,0	100,0	100,0

Sông Đa Độ có chất lượng nước tương đối tốt hơn so với sông Rế với chỉ số chất lượng nước WQI cao hơn ở mức tốt và rất tốt phù hợp cho cấp nước sinh hoạt với các công nghệ xử lý thông thường. Kết quả quan trắc chất lượng nước thô cho 2 nhà máy nước Cầu Nguyệt và Hưng Đạo cho thấy cũng có dấu hiệu ô nhiễm bởi vi sinh và ni tơ thể hiện ở tỷ lệ số mẫu nước vượt quy chuẩn cao (coliform, amoni và nitrit). Ở một nghiên cứu tương tự về chất lượng nước sông Đa Độ cũng cho thấy, có sự gia tăng các chỉ tiêu ô nhiễm như hàm lượng cặn và muối, hợp chất hữu cơ và ni tơ về mùa mưa các năm [10].

So với sông Rế và sông Đa Độ, sông Giá có chất lượng nước tốt nhất. Chỉ số chất lượng nước WQI của sông Giá tại vị trí lấy nước thô cho Nhà máy nước Ngũ Lão đạt mức rất tốt, phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt. Các thông số chất lượng nước quan trắc tại khu vực này hầu hết đều đáp ứng QCVN trong các thời điểm quan trắc. Chất lượng nước ổn định cho thấy khu vực này hiện chưa ghi nhận dấu hiệu ô nhiễm đáng kể từ các nguồn thải trong lưu vực phía bắc của Hải Phòng.

Kết quả nghiên cứu cho thấy cần đẩy mạnh các giải pháp bảo vệ nguồn nước cấp cho sinh hoạt tại lưu vực sông Rế và sông Đa Độ, đặc biệt là kiểm soát nguồn thải từ hoạt động nông nghiệp, công nghiệp và khu dân cư đang gia tăng tại hai khu vực này. Đối với các nguồn nước thô có dấu hiệu suy giảm chất lượng, cần áp dụng các giải pháp xử lý tăng cường nhằm bảo đảm chất lượng nước sinh hoạt, như tăng liều lượng hóa chất xử lý hoặc cải tiến công nghệ xử lý phù hợp với điều kiện nguồn nước suy thoái.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin trân trọng cảm ơn Công ty CP Cấp nước Hải Phòng đã hỗ trợ cung cấp số liệu quan trắc chất lượng nước; đồng thời cảm ơn sự hỗ trợ từ dự án nghiên cứu "Phát triển hệ thống cấp nước thích ứng với nguồn nước ô nhiễm" (SATREPS) được thực hiện tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, do Cơ quan Khoa học và Công nghệ Nhật Bản và Cơ quan Hợp tác Quốc tế Nhật Bản tài trợ, mã số JPMJSA2201.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hoang, A.T., Tran, H. T. D., Tran, A. P., Nguyen, N. A., Van Tran, T., & Tran, C. B. Assessment Model for Water Quality Progression of Gia, Re, and Da Do River for Drinking Water Purpose in Hai Phong City. VN J. Hydrometeorol, no.14, pp. 22-35, 2023.

[2] Ram, A., et al., Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. Applied Water Science, 2021. 11(2): p. 46.

[3] Wang, Y., et al., Evaluation of Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes Using GIS-Based IWQI, EWQI and HHR Model. Water, 2023. 15: p. 2233

[4] Virendrakumar Bhikajirao, P., Review of Groundwater Mapping and Water Quality Assessment Using GIS and Water Quality Index (WQI). International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2024. 12(21s): p. 4612 - 4618.

[5] L. Thị Hồng Vân, L. Thị Hường Nguyễn Thị Kim Nga, and T. Thị Thu Thủy. Đánh giá chất lượng nước mặt trên địa bàn TP Hải Phòng năm 2021 bằng phương pháp tính toán chỉ số chất lượng nước. Tạp chí Môi trường, no.4, 2022.

[6] Şener, Ş., E. Şener, and A. Davraz. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of The Total Environment, no. 584-585, pp. 131-144, 2017.

[7] Masood, A., et al., Integrating water quality index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality. Environmental Science and Pollution Research, 2022. 29(18): p. 26860-26876.

[8] Ali, Wajid & Mohammad, Nafees & Ali Turab, Syed & Khan, Muhammad & Rehman, Khaista. Drinking water quality assessment using water quality index and geostatistical techniques, Mardan District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. Journal of Himalayan Earth Sciences, no. 52, pp. 65-85, 2019.

[9] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Hướng dẫn kỹ thuật tính toán và công bố chỉ số chất lượng nước của Việt Nam (VN_WQI). Tổng cục Môi trường, 2019.

[10] Hằng, D.T., Hương, N. L., Đông, P. D., & Việt Nga, T.T. Đánh giá diễn biến chất lượng nước sông Đa Độ và các giải pháp công nghệ xử lý nước hướng tới cấp nước an toàn. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, no. 19(2V), pp.116-125, 2025.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 15/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Ứng dụng nguyên lý khóa thủy lực trong thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa theo giới hạn tổn thất lọc

Application of the hydraulic lock principle to the design of self-washing floating-media filters at terminal head loss

> TS NGUYỄN THANH PHONG
Bộ môn Công nghệ Nước, Khoa KTHT&MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: nguyenthanhphong73@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tính toán thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa theo nguyên lý khóa thủy lực. Mô hình liên kết ba nội dung: tổn thất lớp lọc sạch, quy luật tăng tổn thất do tích lũy cặn và điều kiện hình học-thủy lực để siphon tự khởi động khi đạt giới hạn tổn thất. Từ đó xác định diện tích lọc, số ngăn, chiều sâu lớp hạt, cao trình đỉnh siphon, thể tích nước rửa và đường kính ống siphon. Ví dụ cho trạm 20 m^3/h cho thấy phương án ba ngăn có tính khả thi và vận hành ổn định.

Từ khóa: Khóa thủy lực; siphon; vật liệu lọc nổi; tự rửa.

ABSTRACT

This paper presents a design method for self-washing floating-media filters based on the hydraulic-lock principle. The model links three components: clean-bed head loss, head-loss growth caused by solids accumulation, and the geometric-hydraulic condition that initiates siphon backwashing at terminal head loss. The method is used to determine filtration area, number of cells, media depth, siphon crest elevation, backwash water volume, and siphon pipe diameter. A 20 m^3/h case study shows that a three-cell configuration is feasible and hydraulically stable in operation.

Keywords: Hydraulic lock; siphon; floating media; self-washing.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều công trình lọc nhanh truyền thống, chu kỳ rửa được xác định theo thời gian cài đặt sẵn hoặc theo lệnh vận hành, trong khi mức độ bẩn thực tế của lớp lọc thay đổi đáng kể theo chất lượng nước đầu vào, chế độ keo tụ và dao động lưu lượng. Cách tiếp cận này làm phát sinh hai hệ quả trái ngược: hoặc rửa quá sớm, gây lãng phí nước rửa và giảm hiệu suất sử dụng thiết bị; hoặc rửa quá muộn, làm tăng nguy cơ xuyên thủng lớp lọc, suy giảm chất lượng nước sau lọc. Vì vậy, xu hướng điều khiển chu kỳ rửa theo tổn thất cột nước của lớp lọc ngày càng được coi là tiếp cận hợp lý hơn về công nghệ và kinh tế.

Trong nhóm thiết bị rửa lọc tự động bằng thủy lực, giá trị cốt lõi nằm ở việc dùng chính chênh lệch mực nước phát sinh qua lớp vật liệu như tín hiệu vận hành. Khi tổn thất qua lớp lọc tăng tới ngưỡng thiết kế, tạo điều kiện mồi dòng và phát động chu kỳ rửa. Toàn bộ trình tự đóng - mở được thực hiện nhờ cấu tạo hình học và cột nước, không cần cảm biến áp suất điện tử hay hệ thống van điều khiển phức tạp. Cơ chế này đặc biệt hấp dẫn đối với các trạm vừa và nhỏ, các công trình ở khu vực thiếu nhân lực vận hành hoặc các hệ thống yêu cầu độ tin cậy cơ học cao.

Ở Việt Nam, một số thử nghiệm pilot đối với bể lọc vật liệu nổi tự rửa đã cho thấy khả năng vận hành ổn định, tự rửa theo chu kỳ tổn thất và đạt hiệu quả xử lý tốt. Tuy nhiên, trong thực tế thiết kế, nhiều hồ sơ vẫn mô tả công nghệ theo hướng định tính mà chưa xây dựng được quy trình tính toán đủ chặt chẽ để chuyển từ yêu cầu công nghệ sang các thông số hình học cụ thể khi áp dụng kết quả nghiên cứu của khóa thủy lực. Đây chính là khoảng trống mà bài báo hướng tới.

Mục tiêu của bài báo là đề xuất trình tự tính toán bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khi đạt giới hạn tổn thất lọc, trong đó nguyên lý khóa thủy lực được coi là phần tử trung tâm liên kết chế độ lọc với chế độ rửa. Trên cơ sở tổng hợp lý thuyết dòng chảy qua lớp hạt, quy luật tăng tổn thất do bám cặn và điều kiện khởi động siphon, bài báo xây dựng một trình tự thiết kế có thể sử dụng cho bước thiết kế sơ bộ và tiền khả thi; đồng thời minh họa bằng ví dụ số cụ thể để người thiết kế có thể áp dụng trực tiếp.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC

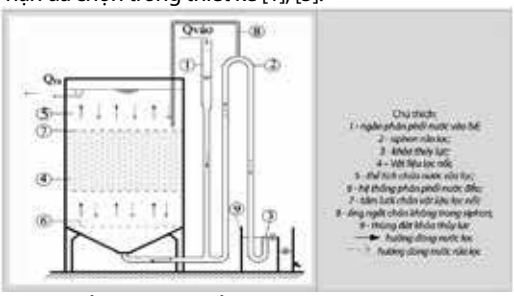
2.1. Cấu tạo chung của bể lọc vật liệu nổi tự rửa theo nguyên lý khóa thủy lực

Cấu tạo của bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khởi động bằng thiết bị khóa thủy lực được thể hiện ở Hình 1.

2.2. Nguyên lý khóa thủy lực và điều kiện tự khởi động rửa lọc

Khóa thủy lực trong công nghệ này hoạt động như một phần tử kích hoạt tự động, sử dụng chính chênh lệch mực nước do tổn thất qua lớp lọc tạo ra. Khi lớp lọc còn sạch, tổn thất nhỏ nên mực nước trong ống phân phối nước vào chưa đạt đến đỉnh siphon; toàn bộ hệ thống vẫn ở trạng thái lọc ổn định. Khi cặn tích tụ, tổn thất tăng dần làm mực

nước tương ứng trong ống phân phối nước vào dâng lên. Đến giá trị giới hạn khi mực nước vượt qua đỉnh ống siphon một khoảng bằng đúng chiều cao khóa thủy lực, siphon sẽ được mồi và dòng nước rửa bắt đầu hình thành. Do đó, cao trình đỉnh siphon, chiều cao khóa thủy lực không chỉ là chi tiết kết cấu mà còn là biểu hiện hình học của giá trị tổn thất giới hạn đã chọn trong thiết kế [1], [5].



Hình 1. Cấu tạo bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khởi động bằng thiết bị khóa thủy lực [1]

Sau khi siphon bắt đầu làm việc, nước trong khoang chứa chảy qua ống siphon với lưu lượng đủ lớn để tạo cường độ rửa cho lớp hạt. Đồng thời, mực nước trong khoang chứa giảm dần. Khi mực nước tụt xuống tới vị trí đáy của ống ngắt chân không trong siphon, không khí lọt vào đỉnh ống, dòng liên tục bị ngắt và chu kỳ rửa kết thúc. Cơ chế tự dừng này là ưu điểm quan trọng của khóa thủy lực vì nó giúp chu kỳ rửa trở nên hữu hạn và lặp lại, không cần thiết bị đóng cắt chủ động. Việc tính đúng cao trình ngắt siphon do đó quan trọng không kém việc xác định cao trình khởi động [1], [5].

Về mặt thiết kế, hệ khóa thủy lực phải thỏa mãn hai yêu cầu: khởi động chắc chắn tại đúng giới hạn tổn thất mong muốn; và ngắt siphon ổn định sau khi đã xả ra lượng nước rửa dự kiến. Nếu chỉ chú ý đến điều kiện khởi động mà bỏ qua điều kiện ngắt siphon, hệ thống có thể tự mồi nhưng không hoàn nguyên tốt lớp lọc hoặc ngược lại kéo dài thời gian rửa quá mức, làm lãng phí nước sạch [1], [5].

2.3. Đặc trưng của lớp vật liệu lọc nổi

Khác với cát và anthracite có khối lượng riêng lớn hơn nước, vật liệu lọc nổi thường là các hạt polymer xốp hoặc đặc, nhẹ, có đường kính từ khoảng 0,8 - 3,0 mm tùy mục đích sử dụng. Do khối lượng riêng nhỏ, lực nổi đóng vai trò quyết định trong tổ chức lớp lọc. Hạt càng nhẹ thì yêu cầu đối với lưới giữ càng cao, nhưng đồng thời cường độ rửa cần thiết để giãn nở hoặc khuấy lớp hạt có thể thấp hơn so với lớp cát lọc truyền thống. Mặt khác, các hạt polymer cũng có bề mặt khác nhau về độ nhám và tính ưa nước, dẫn tới khả năng bám cặn khác nhau [1], [3].

Trong thực hành thiết kế, các thông số vật liệu cần quan tâm gồm: đường kính hiệu dụng d_p, hệ số đồng nhất, khối lượng riêng biểu kiến của hạt, độ rỗng ban đầu của lớp lọc, chiều sâu lớp vật liệu lọc L và độ bền cơ học trong quá trình lặp lại các chu kỳ rửa. Đối với bài toán tự rửa bằng khóa thủy lực, ngoài hiệu quả lọc còn cần quan tâm đến khối lượng nước rửa cần thiết để làm sạch lớp vật liệu, vì chính đại lượng này sẽ chi phối dung tích khoang chứa và tiết diện của ống siphon [1], [3].

3. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

3.1. Xác định diện tích lọc và số ngăn

Với lưu lượng thiết kế Q (m^3/h) và vận tốc lọc bề mặt v_f (m/h), tổng diện tích lọc yêu cầu của hệ là:

$$A_t = \frac{Q}{v_f}$$

Nếu hệ có n ngăn và cho phép 1 ngăn tạm dừng để tự rửa trong khi các ngăn còn lại vẫn đảm nhận toàn bộ lưu lượng thiết kế, diện tích hữu ích của mỗi ngăn phải thỏa mãn điều kiện:

$$A_1 \geq \frac{Q}{(n-1)\cdot v_f}$$

Đây là điều kiện dự phòng công suất tối thiểu. Trên thực tế, nên bố trí hệ số dư nhất định để bù dao động lưu lượng, sai số phân phối dòng và sự suy giảm hiệu quả thủy lực theo thời gian vận hành.

3.2. Tổn thất qua lớp vật liệu lọc

Tổn thất với lớp vật liệu sạch:

Khi không có số liệu Pilot, với các tính toán thiết kế sơ bộ, tổn thất ban đầu của lớp vật liệu nổi có thể được mô tả bằng phương trình Ergun khi cần xét đồng thời thành phần nhớt và quán tính:

$$H_0 = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\cdot\frac{\mu v L}{\rho g d_p^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\cdot\frac{v^2 L}{g d_p}$$

Trong đó ε là độ rỗng lớp hạt; μ là độ nhớt động lực của nước; ρ là khối lượng riêng nước; g là gia tốc trọng trường; v là vận tốc bề mặt; L là chiều sâu lớp lọc; d_p là đường kính tương đương của hạt[5].

Dùng phương pháp mô hình hóa quá trình lọc cho phép thu được lời giải đầy đủ chính xác, và biểu diễn được ở dạng thuận tiện hơn cho việc tính toán thực tế, đồng thời rút gọn rất nhiều khối lượng tính toán, mục đích để thiết lập được biểu đồ thông số thực nghiệm như (Hình 2.). Theo lý thuyết lọc qua lớp VLL dạng hạt của D.M.Mins ta có tổn thất qua lớp VLL sạch [1].

$H_0 = S_0 . L .v = S .v$

Trong đó: H_0 - tổn thất qua lớp VLL sạch (cm); S_0 - là hệ số tổn thất riêng của lớp VLL sạch: L- chiều dày lớp VLL (m); $S_0.L=S$- là hệ số tổn thất qua lớp VLL sạch có chiều dày là L. Trong thực tế S_0 phụ thuộc vào độ rỗng của VLL (m), đường kính tương đương của lớp VLL, hệ số hình dạng α và độ nhớt của nước μ.

Tổn thất với nước bẩn trong quá trình lọc:

Xác định hệ số gia tăng tổn thất theo thời gian (k). Theo lý thuyết lọc dạng hạt của Minz D.M. tốc độ gia tăng tổn thất tỷ lệ thuận với hệ số tổn thất riêng (S_0), tỷ lệ thuận với bình phương vận tốc lọc và tỷ lệ với hệ số k đặc trưng cho: (1) nồng độ chất lơ lửng trong nước lọc; (2) sự phân bố chất lơ lửng trong lớp VLL mà do đó nó sẽ thay đổi độ rỗng của lớp VLL. Hệ số k được xác định bằng thực nghiệm theo công thức sau:

$$\Delta h = S_0.k.v^2.t \Rightarrow k = \frac{\Delta h}{S_0.v^2.t}$$

Có thể viết lại phương trình trên theo biểu đồ tăng tổn thất áp lực lọc theo thời gian mô tả trên Hình 2.

$H = H_0 + tg\alpha . t$; (m)

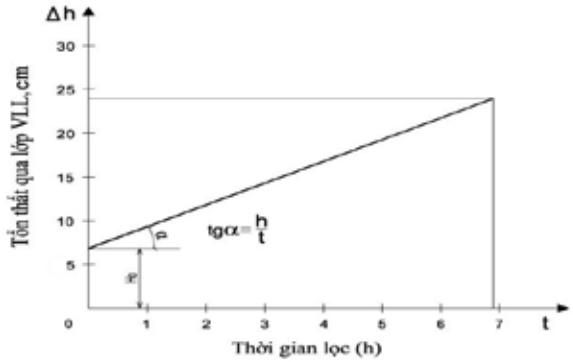
Trong đó:

H: tổng tổn thất áp lực sau thời gian của một chu kỳ lọc; m.

H_0: tổn thất qua lớp VLL sạch xác định bằng thực nghiệm; m.

$tg\alpha = S_0.k.v^2$: trị số xác định bằng thực nghiệm; m/h.

t: thời gian của một chu kỳ lọc.



Hình 2. Biểu đồ tăng tổn thất qua lớp VLL theo thời gian [1]

Khi đó, thời gian của một chu kỳ lọc là:

$$t = \frac{H - H_0}{tg\alpha}$$

Bảng 1. Bảng tra các thông số xác định tổn thất áp lực lọc theo thời gian đối với nguồn nước mặt sau lắng [1]

STT	Hạt VLL nổi	Vận tốc lọc, (m/h)	Tổn thất qua lớp VLL sạch H_o, (cm)	tgα (cm/h)
1	Polystyrene	5	3,15	0,99
		9,6	9,10	1.09
		13,8	10,40	1,26
2	PE	5	4,95	0,69
		9,6	10,52	0,81
		13,6	18,78	1,41

3.3. Giới hạn tổn thất lọc và điều kiện khởi động siphon theo nguyên lý khóa thủy lực

Giới hạn tổn thất lọc Δh_{gh} là giá trị mà tại đó bể phải chuyển từ chế độ lọc sang chế độ rửa ứng với thời gian bảo vệ của lớp vật liệu lọc. Về bản chất, Δh_{gh} được xác định theo thời gian của một chu kỳ lọc, trên cơ sở kết hợp giữa yêu cầu chất lượng nước sau lọc, độ ổn định của lớp hạt và hiệu quả kinh tế của chu kỳ vận hành. Trong hệ dùng siphon, đại lượng này được chuyển hóa trực tiếp thành cao trình đỉnh siphon, chiều cao khóa thủy lực và cao trình mực nước dâng lên trong ngăn phân phối nước và để thắng tổng tổn thất qua lớp vật liệu lọc. Ở mức sơ bộ, điều kiện khởi động có thể biểu diễn như sau:

$$\Delta h_{gh} = z_c - z_r + H_k$$

Ở đây, z_c là cao trình đỉnh siphon; z_r là cao trình mốc thủy lực tham chiếu tại khoang thu nước sau lọc; H_k là chiều cao khóa thủy lực. Từ công thức này có thể thấy việc lựa chọn Δh_{gh} đồng thời quyết định hình học của khóa thủy lực. Theo kết quả nghiên cứu về thông số khóa thủy lực để khởi động xi phông tự rửa lọc, rút ra biểu thức quan hệ giới hạn giữa chiều cao khóa thủy lực H_k và đường kính khóa thủy lực D_k theo điều kiện:

$$5 < \frac{H_k}{D_k} < 10$$

Quan hệ này được dùng để tính toán thiết kế chiều cao khóa tương ứng với các đường kính khác nhau, bảo đảm siphon khởi động ổn định và phù hợp với tổn thất áp lực thiết kế [1].

3.4. Lưu lượng rửa, thể tích nước rửa và đường kính ống siphon

Khi chọn cường độ rửa q_r ($m^3/s{\cdot}m^2$) và thời gian rửa t_r, lưu lượng rửa cho một ngăn được tính:

$$Q_r = q_r A_1$$

Thể tích nước rửa cho một chu kỳ là:

$$V_r = Q_r t_r$$

Nếu nước rửa được cấp nhờ ống siphon từ khoang chứa đặt cao, lưu lượng rửa sơ bộ có thể tính từ phương trình Bernoulli với hệ số lưu lượng C_d:

$$Q_r = C_d A_s \sqrt{2gH}$$

Suy ra diện tích tiết diện dòng và đường kính ống siphon:

$$A_s = \frac{Q_r}{C_d\sqrt{2gH}}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}}$$

Các phương trình này là cầu nối trực tiếp giữa yêu cầu công nghệ rửa với kích thước thực của khóa thủy lực. [1], [4].

4. TRÌNH TỰ THIẾT KẾ ĐỀ XUẤT

Bước 1: Xác định lưu lượng thiết kế, dao động lưu lượng giờ lớn nhất, số ngăn dự kiến và chế độ dự phòng. Đây là bước đặt khung cho toàn bộ bài toán vì quyết định diện tích lọc cần thiết và cách phân chia mô-đun công trình.

Bước 2: Chọn vận tốc lọc căn cứ vào loại nguồn nước, mức SS đầu vào, khả năng keo tụ - tạo bông phía trước và kinh nghiệm vận hành với vật liệu lọc nổi. Với lọc nước mặt sau bể lắng, vận tốc lọc nên chọn trong khoảng 5 - 10 m/h tương ứng với chu kỳ lọc 72 - 36 giờ.

Bước 3: Chọn vật liệu lọc nổi và các thông số ban đầu: đường kính hiệu dụng, chiều sâu lớp lọc, độ rỗng, khối lượng riêng biểu kiến và loại lưới chặn. Nếu có số liệu pilot trên chính nguồn nước nghiên cứu thì ưu tiên sử dụng bộ thông số đó.

Bước 4: Xác định tổn thất lớp lọc sạch bằng phương trình Ergun hoặc Darcy - Kozeny khi không có số liệu thực nghiệm.

Bước 5: Chọn giới hạn tổn thất Δh_{gh} từ yêu cầu công nghệ và điều kiện vận hành. Giá trị này được biến đổi thành cao trình đỉnh siphon, cao trình khoang thu nước sau lọc và chiều cao khóa thủy lực.

Bước 6: Xác định tốc độ tăng tổn thất tgα hoặc đường cong tăng tổn thất theo thời gian; từ đó tính chu kỳ lọc và kiểm tra tính hợp lý so với yêu cầu khai thác công trình.

Bước 7: Chọn cường độ rửa và thời gian rửa, từ đó xác định lưu lượng rửa, thể tích khoang chứa nước rửa và đường kính ống siphon rửa lọc và siphon mồi và thông số khóa thủy lực.

Bước 8: Kiểm tra tổng thể ở các trạng thái biên: đầu chu kỳ lọc, cuối chu kỳ lọc, thời điểm chuyển sang rửa và cuối chu kỳ rửa. Việc kiểm tra này đặc biệt quan trọng để tránh tình trạng hệ thống tự mồi nhưng không tự phá siphon hoặc ngược lại.

Bảng 2. Ký hiệu chính và quy ước chỉ số dùng trong tính toán

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
Q	m^3/h	Lưu lượng thiết kế của trạm hoặc cụm lọc
v_f	m/h	Vận tốc lọc bề mặt
A_t	m^2	Tổng diện tích lọc yêu cầu
A_1	m^2	Diện tích của một ngăn lọc
L	m	Chiều sâu lớp vật liệu lọc
d_p	m	Đường kính tương đương của hạt lọc
ε	-	Độ rỗng của lớp vật liệu
H_0	m	Tổn thất của lớp lọc sạch
Δh_{gh}	m	Giới hạn tổn thất kích hoạt rửa
tgα	m/h	Tốc độ tăng tổn thất theo thời gian
Q_r	m^3/s	Lưu lượng rửa của một ngăn
V_r	m^3	Thể tích nước rửa cho một chu kỳ
D_s	m	Đường kính trong của ống siphon

5. VÍ DỤ TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

5.1. Số liệu ban đầu

Xét thiết kế sơ bộ một cụm lọc hoàn thiện cho lọc nước mặt có keo tụ sau bể lắng trong với lưu lượng trung bình giờ lớn nhất Q = 20 m^3/h. Yêu cầu đặt ra là bể phải tự rửa lọc hoàn toàn tự động theo nguyên lý khóa thủy lực.

Căn cứ số liệu pilot đối với bể lọc polystyrene nổi, chọn vận tốc lọc mục tiêu v_f = 5 m/h; chiều sâu lớp lọc L = 1,2 m; đường kính hiệu dụng hạt d_p = 1,22 mm; độ rỗng ban đầu ε = 0,40; khối lượng riêng biểu kiến của vật liệu 45 kg/m^3. Tổn thất của lớp lọc sạch H_0 = 0,0315 m; giới hạn tổn thất kích hoạt rửa chọn Δh_{gh} = 0,7 m. Tốc độ tăng tổn thất trung bình tgα = 0,99 cm/h. Cường độ rửa chọn q_r = 12 $l/s{\cdot}m^2$, thời gian rửa t_r = 4 phút [1], [3].

Để đảm bảo khả năng vận hành liên tục, chọn hệ gồm 3 ngăn lọc, cho phép 1 ngăn dừng để tự rửa hoặc sửa chữa trong khi 2 ngăn còn lại chịu toàn bộ lưu lượng thiết kế.

5.2. Xác định diện tích và kích thước hình học của một ngăn

Tổng diện tích lọc yêu cầu của toàn hệ:

$$A_t = \frac{20}{5} = 4\ \mathrm{m}^2$$

Do một ngăn có thể nghỉ để rửa hoặc sửa chữa, diện tích tối thiểu của mỗi ngăn là:

$$A_1 = \frac{20}{(3-1)\cdot 5} = 2\ \mathrm{m}^2$$

Nếu chọn ngăn tròn, đường kính hữu ích của mỗi ngăn được xác định:

$$D = \sqrt{\frac{4.A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 2}{3{,}1416}} \approx 1{,}595\ \mathrm{m}$$

Làm tròn theo kích thước thi công, chọn D = 1,6 m. Khi đó diện tích thực của một ngăn là 2,01 m^2.

5.3. Tính tổn thất lớp lọc sạch

Chọn nước ở khoảng 20 - 25 °C với $\mu = 1 \times 10^{-6}$ m^2/s; $\rho = 1000$ kg/m^3; g = 9,81 m/s^2. Đổi vận tốc lọc 5 m/h thành 0,001389 m/s. Thay các giá trị này vào phương trình Ergun cho lớp hạt có ε = 0,40; d_p = 0,00122 m; L = 1,2 m, tính được tổn thất của bản thân lớp hạt sạch [3], [5].

Khi có số liệu thực nghiệm, trị số tổn thất qua lớp vật liệu sạch đối với nguồn nước nghiên cứu sẽ chính xác hơn (Bảng 1.). Với nguồn nước mặt có trộn hóa chất sau bể lắng và vận tốc lọc 5 m/h, tổn thất qua lớp vật liệu lọc sạch là 0,0315 m, tương ứng tốc độ tăng tổn thất tgα = 0,99 cm/h.

5.4. Tính chu kỳ lọc theo giới hạn tổn thất

Độ tăng tổn thất cho phép trước khi kích hoạt tự rửa là:

$$\Delta h_{cp} = 0.7 - 0{,}0315 = 0{,}6685\ \mathrm{m}$$

Đổi tốc độ tăng tổn thất tgα = 0,99 cm/h thành 0,0099 m/h, ta có chu kỳ lọc sơ bộ:

$$t = \frac{0{,}6685}{0{,}0099} = 67{,}5\ \mathrm{h}$$

Như vậy, một ngăn có thể vận hành khoảng 2,8 ngày trước khi tự chuyển sang chu kỳ rửa. Nếu ba ngăn được bố trí vận hành lệch pha, toàn trạm sẽ chỉ có một ngăn bước sang rửa sau khoảng 22 h - 23 h, tránh hiện tượng nhiều ngăn cùng rửa làm xáo trộn chế độ cấp nước [1], [3].

5.5. Xác định cao trình kích hoạt của khóa thủy lực

Với giới hạn tổn thất đã chọn Δh_{gh} = 0,7 m, mực nước trong khoang phân phối tại cuối chu kỳ lọc phải đạt tới đỉnh siphon tương ứng với chênh cột nước này. Nếu lấy cao trình mốc thủy lực z_r tại mặt nước hiệu dụng trong khoang thu, có thể xem z_c cao hơn mốc tham chiếu z_r một khoảng là (Δh_{gh} -H_k). Trong thiết kế kỹ thuật, giá trị này cần được hiệu chỉnh sau khi tính đầy đủ tổn thất mồi, tổn thất cục bộ trong đoạn uốn cong và hệ số an toàn lắp đặt [1]

Thực chất, việc đặt cao trình z_c chính là việc "cơ khí hóa" quyết định công nghệ về thời điểm rửa. Giá trị z_c quá thấp sẽ làm bể rửa quá sớm, trong khi z_c quá cao sẽ kéo dài chu kỳ lọc tới mức nước sau lọc có thể xấu đi hoặc lớp cặn nén chặt quá mức. Vì vậy, đây là thông số hình học nhưng phải được lựa chọn từ góc nhìn công nghệ xử lý nước [3].

5.6. Tính lưu lượng rửa, thể tích nước rửa và ống siphon rửa lọc và siphon mồi

Với cường độ rửa q_r = 12 l/s·m^2 = 0,012 m^3/s·m^2 và diện tích thực của một ngăn A_{th} = 2,01 m^2, lưu lượng rửa cho một ngăn là:

$$Q_r = 0{,}012 \cdot 2{,}01 = 0{,}02412\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

Hay tương đương khoảng 86,8 m^3/h. Với thời gian rửa t_r = 4 phút = 240 s, thể tích nước rửa cho một chu kỳ là:

$$V_r = 0{,}02412 \cdot 240 = 5{,}79\ \mathrm{m}^3$$

Giả sử cột nước hữu hiệu của siphon Hh = 2,5 m và hệ số lưu lượng Cd = 0,128, diện tích tiết diện thủy lực của ống siphon được tính [1]:

$$A_s = \frac{0{,}02412}{0{,}128\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 2{,}5}} \approx 0{,}0269\ \mathrm{m}^2$$

Suy ra đường kính trong yêu cầu của ống siphon:

$$D_s = \sqrt{\frac{4\cdot 0{,}0269}{\pi}} \approx 0{,}185\ \mathrm{m}$$

Với đường kính ống siphon rửa lọc D = 185 mm, việc thiết kế khóa thủy lực với chiều cao ≥ 0,925 m lắp liền với ống siphon rửa lọc là không phù hợp. Do vậy, cần thiết kế siphon mồi để thuận tiện cho lắp đặt, đồng thời tạo khả năng điều chỉnh tăng hoặc giảm thời gian của một chu kỳ lọc phù hợp với thời gian bảo vệ của lớp vật liệu lọc và yêu cầu chất lượng nước sau lọc.

Chọn khóa thủy lực có đường kính D = 30 mm và chiều cao khóa H_k = 0,2 m, sẽ xác định được cao trình đỉnh siphon rửa lọc z_c = 0,7 - 0,2 = 0,5 m so với cao trình mốc tham chiếu z_r ở khoang thu nước sau lọc.

Bảng 3. Tóm tắt kết quả ví dụ tính toán

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Nhận xét
Lưu lượng thiết kế	Q	20 m^3/h	Lưu lượng của toàn hệ
Số ngăn lọc	n	3	Cho phép 1 ngăn ngừng; 2 ngăn còn lại làm việc
Vận tốc lọc	v_f	5 m/h	Phù hợp với dữ liệu pilot
Đường kính ngăn	D	1,6 m	Diện tích thực A_{th} = 2,01 m^2/ngăn
Tổn thất đầu chu kỳ	H_0	0,0315m	Tổn thất của lớp lọc sạch
Giới hạn tổn thất	Δh_{gh}	0,7 m	Ngưỡng kích hoạt tự rửa
Thời gian của một chu kỳ lọc	t	67,5 h	Khoảng 2,8 ngày
Cường độ rửa	q_r	12 l/s·m^2	Trong vùng khuyến nghị
Lưu lượng rửa	Q_r	0,02412 m^3/s	Khoảng 86,8 m^3/h
Thể tích nước rửa	V_r	5,79 m^3	Chưa kể dự trữ an toàn
Đường kính siphon	D_s	185 mm	Có thể chọn DN200

6. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ THIẾT KẾ

Tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến kích thước công trình là vận tốc lọc. Nếu tăng vận tốc lọc trong khi vẫn giữ nguyên lưu lượng thiết kế, diện tích lọc giảm nhưng tổn thất lớp sạch tăng và tốc độ tích lũy tổn thất do bẩn thường cũng tăng. Điều này rút ngắn chu kỳ lọc và kéo theo số lần tự rửa tăng lên.

Chiều sâu lớp lọc L là tham số ảnh hưởng hai chiều. Khi tăng L, khả năng chứa cặn của lớp hạt tăng và chu kỳ lọc có thể kéo dài, nhưng tổn thất lớp sạch cũng tăng. Với vật liệu nổi tăng vừa phải chiều sâu lớp hạt thường có lợi cho độ ổn định vận hành.

Đường kính hạt d_p ảnh hưởng đồng thời đến khả năng bắt giữ cặn và tổn thất thủy lực. Hạt nhỏ giúp tăng diện tích bề mặt và khả

năng giữ cặn mịn, nhưng làm tăng nhanh tổn thất qua lớp hạt sạch. Hạt lớn giảm tổn thất nhưng có thể làm suy giảm hiệu quả lọc tinh. Vì vậy, việc chọn cỡ hạt phải dựa trên mục tiêu chất lượng nước sau lọc và mức tiền xử lý của nguồn nước đầu vào.

Giới hạn tổn thất Δh_{gh} là tham số công nghệ có ảnh hưởng trực tiếp đến chu kỳ lọc và gián tiếp đến hình học khóa thủy lực. Nếu tăng Δh_{gh}, chu kỳ lọc kéo dài, nhưng đồng thời cần tăng cao trình đỉnh siphon hoặc tăng chiều cao phần nước làm việc, dẫn tới công trình cao hơn.

Cuối cùng, cường độ rửa q_r quyết định chất lượng hoàn nguyên lớp vật liệu. Nếu q_r quá thấp, lớp hạt chỉ được xáo trộn một phần, cặn không được loại bỏ triệt để và chu kỳ kế tiếp sẽ ngắn đi nhanh chóng. Ngược lại, q_r quá cao có thể gây thất thoát hạt, làm tăng tải cho máng thu nước rửa và đòi hỏi dung tích khoang chứa lớn hơn đáng kể. Do đó, q_r phải được chọn cùng với thời gian rửa để vừa bảo đảm hiệu quả hoàn nguyên vừa giữ cho thể tích nước rửa ở mức kinh tế.

7. THẢO LUẬN

Phương pháp được trình bày trong bài báo có ưu điểm lớn là biến một công nghệ thường được mô tả định tính thành một quy trình thiết kế có thể lượng hóa từng bước. Nhờ xem giới hạn tổn thất như biến trung tâm, người thiết kế có thể liên kết trực tiếp yêu cầu chất lượng nước sau lọc với cao trình đỉnh siphon, dung tích ngăn chứa và chu kỳ rửa. Điều này làm rõ hơn đáng kể cơ sở lựa chọn thông số so với cách làm chỉ dựa vào kinh nghiệm hoặc sao chép cấu hình công trình đi trước.

Tuy nhiên, phương pháp cũng có giới hạn rõ ràng. Thứ nhất, mô hình tăng tổn thất tuyến tính chỉ phù hợp cho giai đoạn sơ bộ và đối với nguồn nước tương đối ổn định. Thứ hai, hệ số lưu lượng của siphon và tổn thất cục bộ trong toàn bộ chu trình rửa phụ thuộc nhiều vào chi tiết cấu tạo; vì vậy, các giá trị tính toán vẫn cần kiểm chứng bằng mô hình pilot hoặc giai đoạn chạy thử.

Dù vậy, bài toán sơ bộ vẫn có ý nghĩa rất lớn trong thực hành. Nó cho phép nhanh chóng kiểm tra xem một phương án tự rửa bằng khóa thủy lực có khả thi hay không, liệu chiều cao công trình có nằm trong giới hạn cho phép, dung tích nước rửa có quá lớn so với không gian bố trí hay không. Khi những kiểm tra ban đầu này cho kết quả hợp lý, việc chuyển sang thiết kế chi tiết và thí nghiệm hiệu chỉnh sẽ tiết kiệm hơn nhiều.

8. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một khung tính toán tích hợp cho thiết kế bể lọc vật liệu lọc nổi tự rửa khi đạt giới hạn tổn thất lọc, trong đó nguyên lý khóa thủy lực được xem là phần tử trung tâm kết nối giữa chế độ lọc và chế độ rửa. Khung tính toán này bao gồm: xác định diện tích lọc và số ngăn; tính tổn thất lớp hạt sạch; lựa chọn giới hạn tổn thất; mô hình hóa sự tăng tổn thất theo thời gian; và tính lưu lượng rửa, thể tích nước rửa cùng kích thước ống siphon, cao trình đỉnh ống siphon.

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng nguyên lý khóa thủy lực trong thiết kế bể lọc vật liệu nổi không chỉ giúp đơn giản hóa vận hành mà còn tạo ra một ngôn ngữ thiết kế thống nhất, trong đó giá trị tổn thất giới hạn được chuyển hóa trực tiếp thành hình học công trình. Điều này có giá trị thực tiễn cao đối với thiết kế sơ bộ, lựa chọn phương án và xây dựng các thí nghiệm pilot phục vụ hiệu chỉnh thông số.

Để nâng cao độ tin cậy của thiết kế chi tiết, tác giả kiến nghị mọi dự án áp dụng công nghệ này cần có bước hiệu chỉnh bằng số liệu pilot hoặc chạy thử trên chính nguồn nước dự kiến xử lý, đặc biệt khi nguồn nước có biến động lớn về SS hoặc đặc tính bông cặn. Việc hiệu chỉnh sẽ giúp xác lập chính xác hơn tốc độ tăng tổn thất, cường độ rửa tối ưu và điều kiện mồi – ngắt siphon trong điều kiện thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Thanh Phong, Nghiên cứu quá trình tự rửa bể lọc vật liệu lọc nổi dùng cho các trạm cấp nước quy mô nhỏ, luận án tiến sĩ kỹ thuật cơ sở hạ tầng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 2017.

[2] Trần Thanh Sơn, Nguyễn Thanh Phong và nhóm nghiên cứu, Nghiên cứu công nghệ tự rửa bể lọc VLL nổi xử lý nước cấp cho sinh hoạt, Đề tài nghiên cứu độc lập cấp nhà nước mã số ĐTĐL.2009/T02, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2014.

[3] Trần Thanh Sơn, Phạm Văn Dương, Advanced wastewater treatment by hydraulic automatic floating media filter, Vietnam Journal of Science and Technology, 2017.

[4] Trịnh Xuân Lai, Xử lý nước thiên nhiên cấp cho sinh hoạt và công nghiệp, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2002.

[5] SUEZ, Water Treatment Handbook, phần Filtration: Fundamental equations. SUEZ , 1991.

■Ngày nhận bài: 28/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Công tác kiểm kê đất đai và thành lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2024 sau khi sáp nhập đơn vị hành chính: Nghiên cứu tại xã Phước Long, tỉnh Cà Mau

Land Inventory and Compilation of the 2024 Current Land Use Map Following Administrative Unit Consolidation: A Case Study in Phuoc Long Commune, Ca Mau Province

> THS MAI THỊ DUYÊN
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM
Email: duyenmt@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Công tác thống kê, kiểm kê đất đai và thành lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất (HTSDĐ) giữ vai trò quan trọng trong quản lý đất đai. Năm 2024 là năm đầu tiên thực hiện thống kê và kiểm kê đất đai theo các quy định mới tại Luật Đất đai 2024 và Thông tư 08/2024/TT-BTNMT. Đồng thời, sau ngày 01/7/2025, việc sáp nhập đơn vị hành chính đặt ra yêu cầu cập nhật, điều chỉnh thông tin thống kê, kiểm kê và bản đồ hiện trạng sử dụng đất cho phù hợp với đơn vị hành chính mới.

Nghiên cứu sử dụng phần mềm MicroStation V8i, gCadas tại xã Phước Long, tỉnh Cà Mau để thực hiện công tác kiểm kê đất đai và xây dựng bản đồ HTSDĐ năm 2024 sau khi sáp nhập đơn vị hành chính, từ đó truy xuất dữ liệu, bảng biểu, đánh giá biến động sử dụng đất so với kì trước làm cơ sở cho việc quản lý đất đai theo chính quyền 2 cấp. Kết quả đề tài là tài liệu cơ bản cho việc lập, điều chỉnh quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất trong giai đoạn 2026 - 2030 và là tài liệu để xây dựng một số bản đồ chuyên đề khác.

Từ khóa: Kiểm kê; bản đồ hiện trạng sử dụng đất; sáp nhập đơn vị hành chính.

ABSTRACT

Land statistics, land inventory, and the compilation of current land use maps play a crucial role in land administration. The year 2024 marks the first implementation of land statistics and land inventory in accordance with the new provisions of the 2024 Land Law and Circular No. 08/2024/TT-BTNMT. Furthermore, the consolidation of administrative units after July 1, 2025, necessitates corresponding updates and revisions to land statistics, inventory data, and current land use maps. This study employs MicroStation V8i and gCadas software in Phuoc Long Commune, Ca Mau Province, to conduct the 2024 land inventory and compile the current land use map following administrative unit consolidation. The resulting datasets enable data extraction, tabulation, and assessment of land use changes compared with the previous period, thereby providing a basis for land administration under the two-tier local government system. The outcomes of this study constitute fundamental reference materials for the formulation and adjustment of land use planning and land use plans for the 2026–2030 period and also serve as a basis for the development of several thematic maps.

Keywords: Land Inventory; current land use map; consolidation of administrative units.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa diễn ra mạnh mẽ, nhu cầu sử dụng đất ngày càng tăng thì việc quản lý, theo dõi diễn biến sử dụng đất đòi hỏi phải có hệ thống thông tin đầy đủ, chính xác và cập nhật. Vì vậy công tác thống kê, kiểm kê đất đai và thành lập bản đồ HTSDĐ giữ vai trò nền tảng, làm cơ sở để quản lý, sử dụng đất hiệu quả; cung cấp thông tin, số liệu, tài liệu làm căn cứ để lập, điều chỉnh quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất; làm cơ sở đề xuất việc điều chỉnh chính sách, pháp luật về đất đai; cung cấp số liệu để xây dựng niên giám thống kê các cấp và phục vụ nhu cầu thông tin đất đai cho các hoạt động kinh tế - xã hội, quốc phòng, an ninh, nghiên cứu khoa học, giáo dục và đào tạo cũng như các nhu cầu khác của Nhà nước và xã hội [5].

Theo Luật Đất đai 2024 và Thông tư 08/2024/TT-BTNMT, công tác kiểm kê đất đai và lập bản đồ HTSDĐ được thực hiện định kì 5

năm vào các năm có chữ số tận cùng là 4 và 9 [3], [6]. Năm 2024 là năm đầu tiên thực hiện thống kê và kiểm kê đất đai theo các quy định mới tại Luật Đất đai 2024 và Thông tư 08/2024/TT-BTNMT với nhiều điều chỉnh quan trọng về nội dung, phương pháp và yêu cầu chuẩn hóa dữ liệu. Đặc biệt, sau ngày 01/7/2025 việc sáp nhập đơn vị hành chính từ ba cấp xuống hai cấp đòi hỏi thông tin về thống kê, kiểm kê và bản đồ HTSDĐ cũng cần thay đổi, cập nhật theo.

Hiện nay việc ứng dụng công nghệ thông tin vào công tác thống kê, kiểm kê, đánh giá hiện trạng sử dụng đất đã phát huy nhiều ưu điểm và cho thấy hiệu quả rõ rệt. Hiện có rất nhiều phần mềm, công cụ hỗ trợ cho công tác thống kê, kiểm kê đất đai và xây dựng bản đồ HTSDĐ, có thể kể đến MicroStation, ArcGIS, TK Destop, TKKK2024, gCadas, VietMapXM. Trong nghiên cứu này, phần mềm MicroStation V8i và gCadas được sử dụng để thực hiện công tác kiểm kê đất đai và xây dựng bản đồ HTSDĐ năm 2024 trong bối cảnh sáp nhập đơn vị hành chính. Từ đó, nghiên cứu tiến hành trích xuất dữ liệu, bảng biểu và đánh giá biến động sử dụng đất so với kỳ trước, làm cơ sở phục vụ công tác quản lý đất đai theo mô hình chính quyền địa phương hai cấp. Nghiên cứu được thực hiện tại xã Phước Long, tỉnh Cà Mau.

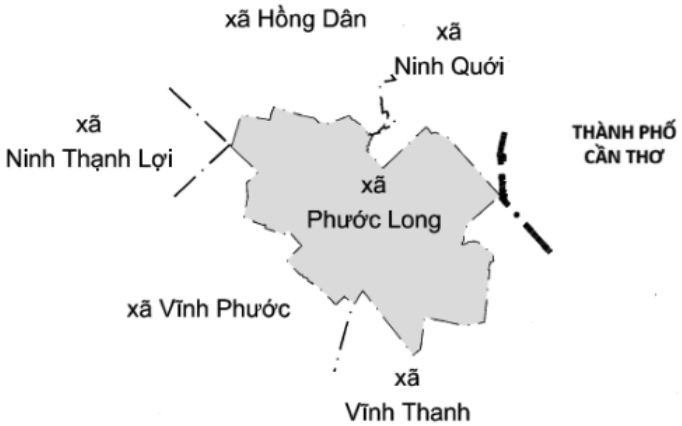
Hiện nay, việc ứng dụng công nghệ thông tin trong công tác thống kê, kiểm kê và đánh giá hiện trạng sử dụng đất đã phát huy nhiều ưu điểm, mang lại hiệu quả rõ rệt. Hiện có nhiều phần mềm, công cụ hỗ trợ công tác thống kê, kiểm kê đất đai và xây dựng bản đồ hiện trạng sử dụng đất (HTSDĐ), có thể kể đến như MicroStation, ArcGIS, TK Desktop, TKKK2024, gCadas, VietMapXM,…

Trong nghiên cứu này, phần mềm MicroStation V8i và gCadas được sử dụng để thực hiện công tác kiểm kê đất đai và xây dựng bản đồ HTSDĐ năm 2024 trong bối cảnh sáp nhập đơn vị hành chính. Từ đó, nghiên cứu tiến hành trích xuất dữ liệu, bảng biểu và đánh giá biến động sử dụng đất so với kỳ trước, làm cơ sở phục vụ công tác quản lý đất đai theo mô hình chính quyền địa phương hai cấp. Nghiên cứu được thực hiện tại xã Phước Long, tỉnh Cà Mau.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan khu vực nghiên cứu

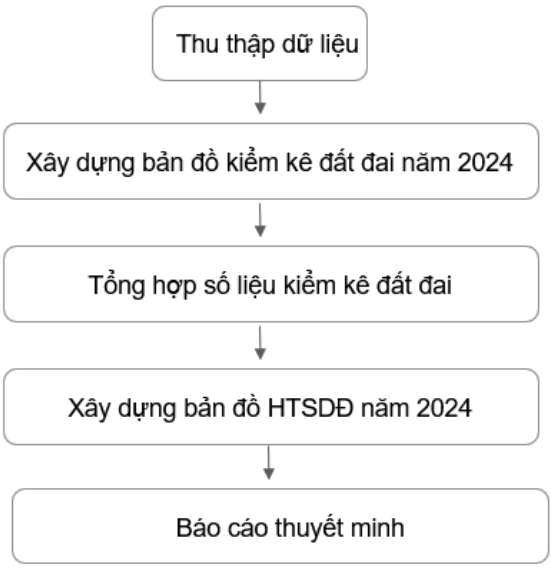
Xã Phước Long, tỉnh Cà Mau được thành lập trên cơ sở hợp nhất xã Vĩnh Phú Đông và thị trấn Phước Long thuộc huyện Phước Long, tỉnh Bạc Liêu (cũ). Xã Phước Long có diện tích tự nhiên là 9.812,14 ha, chiếm 1,24% tổng diện tích của tỉnh, có ranh giới hành chính tiếp giáp như sau: Phía Đông và phía Nam: giáp xã Vĩnh Thanh, phía Bắc: giáp xã Hồng Dân và xã Ninh Quới, phía Tây: giáp xã Vĩnh Phước.



Hình 1. Sơ đồ vị trí xã Phước Long, tỉnh Cà Mau

2.2. Quy trình thực hiện

Quá trình kiểm kê đất đai và lập bản đồ HTSDĐ năm 2024 sau khi sáp nhập đơn vị hành chính được thực hiện theo quy trình Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ các bước thực hiện

2.2.1. Thu thập dữ liệu

- Thu thập hồ sơ, tài liệu, dữ liệu ranh giới, địa giới đơn vị hành chính xã Phước Long theo Nghị quyết số 1655/NQ-UBTVQH15 ngày 16/6/2025 của Ủy ban Thường vụ Quốc hội về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp xã trên địa bàn tỉnh Cà Mau năm 2025.

- Thu thập hồ sơ, tài liệu kiểm kê đất đai năm 2024 gồm: Bản đồ kiểm kê đất đai, bản đồ hiện trạng sử dụng đất, báo cáo kết quả kiểm kê đất đai, hệ thống biểu, ... của xã Vĩnh Phú Đông và thị trấn Phước Long (cũ).

2.2.2. Xây dựng bản đồ kiểm kê đất đai năm 2024

Bản đồ kiểm kê đất đai là bản đồ thể hiện các khoanh đất khép kín trong một đơn vị hành chính cấp xã, các khoanh đất thể hiện được diện tích theo loại đất, đối tượng sử dụng đất, đối tượng được giao quản lý đất theo quy định tại các khoản 2, 3 và 4 Điều 4 Thông tư 08/2024/TT-BTNMT.

Bản đồ kiểm kê đất đai được lập ở dạng số và được thực hiện theo Phụ lục VI ban hành kèm theo Thông tư 08/2024/TT-BTNMT.

Bản đồ kiểm kê đất đai của xã Phước Long được lập trên cơ sở tổng hợp, tiếp biên từ bản đồ kiểm kê đất đai của xã Vĩnh Phú Đông và thị trấn Phước Long, thuộc huyện Phước Long, tỉnh Bạc Liêu (cũ) đã được thực hiện trong kỳ kiểm kê đất đai năm 2024, gồm: gộp, tiếp biên, chuẩn hóa với địa giới đơn vị hành chính cấp xã mới sau sắp xếp; xử lý tiếp biên, khớp nối các khoanh đất và đối tượng khác của bản đồ; chuẩn hóa phân lớp (level), màu và các yếu tố nội dung bản đồ (đánh lại số thứ tự khoanh đất; xử lý các khu vực chồng hở, chồng đè; chuẩn hóa mã loại đất, mã đối tượng sử dụng đất, mã đối tượng được nhà nước giao quản lý đất, diện tích, …).

2.2.3. Tổng hợp số liệu kiểm kê đất đai

Chuyển bản đồ kiểm kê đất đai cấp xã sau sắp xếp đã hoàn thành vào phần mềm gCadas để thực hiện tổng hợp số liệu kiểm kê đất đai theo quy định. Số liệu kiểm kê đất đai năm 2024 của cấp xã được tổng hợp vào Biểu 01/TKKK, Biểu 02/TKKK, Biểu 04/TKKK và Biểu 05/TKKK theo quy định tại Phụ lục 01 ban hành kèm theo Thông tư số 08/2024/TT-BTNMT. Đối với biểu 05/TKKK cần so sánh với số liệu của kỳ kiểm kê đất đai năm 2019 để xác định biến động của các loại đất và sự chu chuyển giữa các loại đất với nhau.

2.2.4. Xây dựng bản đồ HTSDĐ năm 2024

Bản đồ HTSDĐ được lập trên cơ sở tiếp biên, tổng hợp, khái quát hóa nội dung của bản đồ kiểm kê đất đai cấp xã sau khi thực hiện sắp xếp đơn vị hành chính.

Tỷ lệ của bản đồ HTSDĐ cấp xã được thực hiện theo đúng quy định tại Khoản 2 Điều 16 Thông tư số 08/2024/TT-BTNMT ngày 31/7/2024 được sửa đổi, bổ sung tại khoản 2 Điều 3 Thông tư số 23/2025/TT-BNNMT ngày 20/6/2025.

Bảng 1. Tỷ lệ bản đồ HTSDĐ cấp xã theo diện tích tự nhiên

Đơn vị hành chính	Diện tích tự nhiên (ha)	Tỷ lệ bản đồ
Cấp xã	Từ 120 đến 500	1: 2.000
	Trên 500 đến 3.000	1: 5.000
	Trên 3.000 đến 12.000	1: 10.000
	Trên 12.000	1: 25.000

Xã Phước Long có diện tích tự nhiên là 9812,14 ha, nằm trong khoảng trên 3.000 đến 12.000 ha, do vậy được biên tập ở tỷ lệ 1: 10.000.

Cơ sở toán học: Bản đồ HTSDĐ cấp xã được lập trong hệ quy chiếu và hệ tọa độ quốc gia VN-2000, hệ độ cao quốc gia, lưới chiếu hình trụ ngang đồng góc, múi chiếu 3° (3 độ), hệ số điều chỉnh tỷ lệ biến dạng chiều dài k_0 = 0,9999, kinh tuyến trục 104°30′.

Bản đồ HTSDĐ cấp xã thể hiện ở các thông số: Đơn vị đo (Working Units); đơn vị làm việc chính (Master Units) là mét (m); đơn vị làm việc phụ (Sub Units) là milimét (mm); độ phân giải (Resolution) là 1000; tọa độ điểm trung tâm làm việc (Storage Center Point/Global Origin) là X: 500000m, Y: 1000000 m.

Bản đồ HTSDĐ cấp xã ở dạng số được lưu trữ dưới định dạng tệp tin *.dgn, kèm theo bộ ký hiệu; tệp tin ở dạng mở, cho phép chỉnh sửa, cập nhật thông tin khi cần thiết và định dạng fonts chữ, số tiếng Việt theo bảng mã Unicode TCVN 6909:2001; thống nhất sử dụng bộ thư viện các ký hiệu độc lập và các ký hiệu hình tuyến đã được thiết kế sẵn cho các tỷ lệ của bản đồ…

Bản đồ BHSDĐ được biên tập theo quy định tại điều 18, Thông tư số 08/2024/TT-BTNMT.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

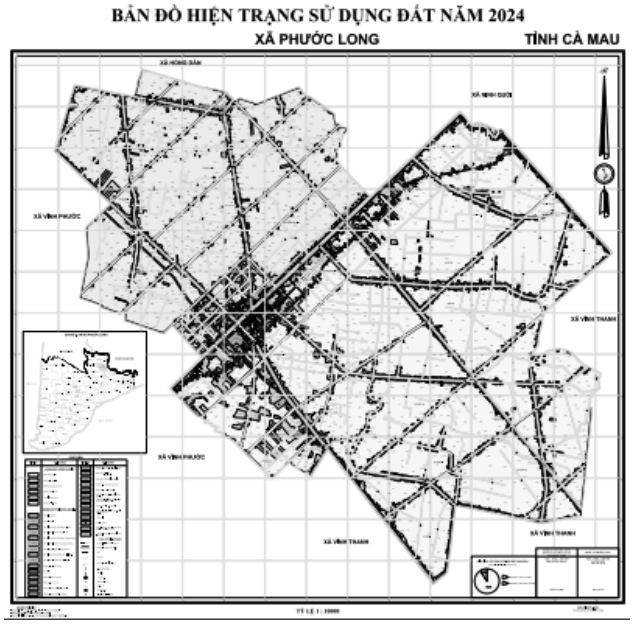
3.1. Hiện trạng sử dụng đất xã Phước Long, tỉnh Cà Mau

Từ bản đồ kiểm kê đất đai xã Phước Long năm 2024 (Hình 3) đưa vào phần mềm gCadas, kết quả tổng diện tích tự nhiên của xã Phước Long là 9.812,14 ha. Trong đó, diện tích đất nông nghiệp 8.914,16, chiếm 90,85%; diện tích đất phi nông nghiệp 897,98 ha, chiếm 9,15%, diện tích đất chưa sử dụng là 0 ha, chiếm 0% diện tích tự nhiên.

Bảng 2. Thống kê diện tích theo mục đích sử dụng (đơn vị: ha)

STT	Mục đích sử dụng	Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)
	Tổng diện tích tự nhiên	9.812,14	100,00
I	***Nhóm đất nông nghiệp***	***8.914,16***	***90,85***
1	Đất trồng cây hằng năm	5.196,09	58,29
2	Đất trồng cây lâu năm	1.003,05	11,25
3	Đất lâm nghiệp	0,00	0,00
4	Đất nuôi trồng thủy sản	2.706,87	30,37
5	Đất chăn nuôi tập trung	0,00	0,00
6	Đất làm muối	0,00	0,00
7	Đất nông nghiệp khác	8,15	0,09
II	***Nhóm đất phi nông nghiệp***	***897,98***	***9,15***
1	Đất ở	191,11	21,28
2	Đất xây dựng trụ sở cơ quan	5,46	0,61
3	Đất quốc phòng, an ninh	4,14	0,46
4	Đất xây dựng công trình sự nghiệp	18,41	2,05
5	Đất sản xuất, kinh doanh phi nông nghiệp	17,18	1,91
6	Đất sử dụng vào mục đích công cộng	522,07	58,14
7	Đất tôn giáo	3,69	0,41
8	Đất tín ngưỡng	0,28	0,03
9	Đất nghĩa trang, nhà tang lễ, cơ sở hỏa táng; đất cơ sở lưu trữ tro cốt	9,01	1,00
10	Đất có mặt nước chuyên dùng	126,62	14,10
11	Đất phi nông nghiệp khác	0,00	0,00
III	***Nhóm đất chưa sử dụng***	***0,00***	***0,00***

Hình 3. Bản đồ kiểm kê đất đai xã Phước Long năm 2024



Hình 4. Bản đồ HTSDĐ xã Phước Long năm 2024

Nhìn vào bảng cơ cấu thấy rằng: tỷ lệ đất nông nghiệp chiếm chủ yếu so với nhóm đất phi nông nghiệp, điều đó phản ánh đặc điểm phát triển nông nghiệp chiếm ưu thế tại địa phương, đồng thời cho thấy tốc độ chuyển đổi đất phi nông nghiệp vẫn còn hạn chế.

3.2. Biến động diện tích các loại đất giai đoạn 2019 - 2024

Bảng 3. Biến động diện tích theo mục đích sử dụng đất (đơn vị: ha)

STT	Mục đích sử dụng đất	Diện tích năm 2024 (ha)	So với năm 2019	
			Diện tích (ha)	Tăng (+); giảm (-)
	Tổng diện tích tự nhiên	***9.812,14***	***9.811,14***	***1,00***
I	***Nhóm đất nông nghiệp***	***8.914,16***	***8.951,83***	***-37,66***
1	Đất trồng cây hằng năm	5.196,09	5.219,74	-23,65
2	Đất trồng cây lâu năm	1.003,05	1.008,27	-5,22
3	Đất lâm nghiệp	0,00	0,00	0,00
4	Đất nuôi trồng thủy sản	2.706,87	2.715,67	-8,80
5	Đất chăn nuôi tập trung	0,00	0,00	0,00
6	Đất làm muối	0,00	0,00	0,00
7	Đất nông nghiệp khác	8,15	8,15	0,00
II	***Nhóm đất phi nông nghiệp***	***897,98***	***859,31***	***38,67***
1	Đất ở	191,11	182,61	8,50
2	Đất xây dựng trụ sở cơ quan	5,46	6,61	-1,15
3	Đất quốc phòng, an ninh	4,14	3,90	0,24
4	Đất xây dựng công trình sự nghiệp	18,41	18,83	-0,42
5	Đất sản xuất, kinh doanh phi nông nghiệp	17,18	4,56	12,62
6	Đất sử dụng vào mục đích công cộng	522,07	503,96	18,11
7	Đất tôn giáo	3,69	3,06	0,63
8	Đất tín ngưỡng	0,28	0,28	0,00
9	Đất nghĩa trang, nhà tang lễ, cơ sở hỏa táng; đất cơ sở lưu trữ tro cốt	9,01	9,56	-0,55
10	Đất có mặt nước chuyên dùng	126,62	125,94	0,68
11	Đất phi nông nghiệp khác	0,00	0,00	0,00
III	***Nhóm đất chưa sử dụng***	***0,00***	***0,00***	***0,00***

Đất nông nghiệp giảm 37,66 ha so với năm 2019, phù hợp với xu thế phát triển kinh tế - xã hội, giảm tỷ trọng đất nông nghiệp, tăng tỷ trọng đất phi nông nghiệp. Trong nội bộ đất nông nghiệp có sự chuyển dịch nhằm ổn định diện tích xâm canh, tăng năng suất sản lượng cây trồng, nâng cao hiệu quả kinh tế cho người sử dụng đất…. Biến động đất nông nghiệp mang tính tích cực, góp phần vào việc nâng cao hiệu quả sử dụng đất đai tại địa phương.

Diện tích đất phi nông nghiệp tăng 38,67 ha so với năm 2019 chủ yếu tăng cho đất ở, đất có mặt nước chuyên dùng, nhằm mục đích bố trí thêm đất ở cho dân số phát sinh và đồng thời đẩy mạnh phát triển các ngành nghề sản xuất, kinh doanh phi nông nghiệp, thương mại dịch vụ cho đồng bộ với kết cấu hạ tầng đô thị theo hướng công nghiệp hóa, hiện đại hóa; các loại đất phi nông nghiệp còn lại được sử dụng tương đối ổn định. Đất phi nông nghiệp đã và đang mang lại hiệu quả kinh tế - xã hội thiết thực cho người dân trên địa bàn xã. Diện tích đất chưa sử dụng không thay đổi so với năm 2019.

3.3. Thảo luận

Công tác kiểm kê đất đai và lập bản đồ HTSDĐ xã Phước Long, tỉnh Cà Mau năm 2024 sau khi sáp nhập đơn vị hành chính là một công việc bắt buộc, có ý nghĩa quan trọng trong quản lý đất đai của địa phương đối với chính quyền 2 cấp, giúp địa phương có thể điều chỉnh quy hoạch sử dụng đất giai đoạn 2026 - 2030 nhằm đảm bảo sự phát triển kinh tế bền vững, phù hợp với tiềm năng đất đai của xã và định hướng phát triển trong bối cảnh chung của tỉnh. Kết quả của đề tài cho thấy khả năng ứng dụng cao của phần mềm MicroStaion V8i, gCadas trong công tác thống kê, kiểm kê và lập bản đồ HTSDĐ đáp ứng đầy đủ quy định theo Luật đất đai 2024 và Thông tư 08/2024/TT-BTNMT.

4. KẾT LUẬN

Kết quả của nghiên cứu là bản đồ kiểm kê đất đai và bản đồ HTSDĐ năm 2024 của xã Phước Long, tỉnh Cà Mau sau khi sáp nhập địa giới hành chính, đồng thời thông qua phần mềm gCadas truy xuất được kết quả các số liệu bảng biểu theo quy định, đáp ứng đầy đủ các yêu cầu của TT08/2024/TT-BTNMT. Sản phẩm bản đồ HTSDĐ năm 2024 là tài liệu cơ bản phục vụ quản lý đất đai, lập, điều chỉnh quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất trong giai đoạn 2026 - 2030 và là tài liệu để xây dựng một số bản đồ chuyên đề khác.

Tuy nhiên, trong quá trình biên tập bản đồ, việc trình bày nhãn khoanh đất còn chồng đè lên các yếu tố nội dung bản đồ khác, các yếu tố kinh tế, xã hội chưa ghi chú đầy đủ trên bản đồ hiện trạng, một số ghi chú bản đồ bố trí chưa hợp lý, chồng đè lên các yếu tố khác, một số khoanh đất có diện tích nhỏ hơn 16mm² trên bản đồ chưa được khái quát hóa theo quy định, một số khoanh đất nông nghiệp nhỏ hơn 16mm² nằm trong khu dân cư tập trung bị gộp lại thành đất ở…

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Công văn số 3947/BNNMT-QLĐĐ về việc tổng hợp số liệu kiểm kê đất đai và lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2024 của các cấp sau khi sắp xếp đơn vị hành chính, 2025.

[2] Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Thông tư số 23/2025/TT-BNNMT quy định phân cấp, phân định thẩm quyền quản lý nhà nước trong lĩnh vực đất đai, 2025.

[3] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Thông tư số 08/2024/TT-BTNMT quy định về thống kê, kiểm kê đất đai và lập bản đồ hiện trạng sử dụng đất, 2024

[4] Đặng Trung Thành, Nguyễn Hoàng Huy. Ứng dụng MicroStation và TK Destop trong xây dựng bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2024 xã Thanh Tuyền. Kỉ yếu hội thảo Ứng dụng GIS toàn quốc 2025, Trường Đại học Thủ Dầu Một, tr 263-273, 2025.

[5] Nguyễn Thế Công, Trần Xuân Miễn. Nghiên cứu xây dựng công cụ hỗ trợ tự động hóa thành lập các bảng, biểu phục vụ công tác thống kê, kiểm kê đất đai. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, Tập 58, Kỳ 6, 2017, tr 66-71. Internet: https://jmes.humg.edu.vn/images/paper/10.%20Nguyen%20The%20Cong.pdf (truy cập tháng 11/2025)

[6] Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Luật Đất đai, 2024.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 15/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Tổng quan công nghệ lọc nano đặt ngập trong xử lý nước mặt và tiềm năng ứng dụng tại Việt Nam

A review of submerged nanofiltration technology for surface water treatment and its potential applications in Vietnam

> THS NGUYỄN THÀNH CÔNG
Bộ môn Công nghệ Nước, Khoa KTHT&MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: Congnt@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Sự gia tăng nồng độ chất hữu cơ tự nhiên (NOM) và các vi ô nhiễm mới nổi trong nguồn nước mặt tại Việt Nam đang đặt ra thách thức cho hoạt động cấp nước an toàn, đảm bảo cho sức khỏe cộng đồng. Phần lớn các nhà máy cấp nước đang sử dụng công nghệ xử lý truyền thống, vốn không xử lý hiệu quả nguồn ô nhiễm này. Thực tiễn này đặt ra nhu cầu nghiên cứu và ứng dụng các công nghệ xử lý nước tiên tiến nhằm nâng cấp các hệ thống xử lý hiện hữu, thích ứng với xu hướng suy giảm chất lượng nguồn nước mặt ngày càng trầm trọng. Lọc nano (NF) được biết đến là một giải pháp công nghệ thay thế hiệu quả để loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ do tính chọn lọc cao. Trong đó màng NF với cấu hình tấm phẳng đặt ngập (SNF) được chứng minh có thể loại bỏ 70-90% chất hữu cơ, kiểm soát độ đục rất tốt, xử lý hiệu quả hợp chất gây mùi và các vi ô nhiễm như PFAS, đồng thời tiêu thụ năng lượng thấp hơn hệ thống NF truyền thống. Bài báo này sẽ đánh giá tổng quan công nghệ màng SNF trong quy trình xử lý nước mặt ô nhiễm cấp cho sinh hoạt thông qua các nghiên cứu từ Nhật Bản. Phân tích triển vọng ứng dụng công nghệ SNF để xử lý nước mặt ô nhiễm hữu cơ tại Việt Nam. Đồng thời nghiên cứu cũng chỉ ra các thách thức và khoảng trống khoa học cần làm rõ để có cơ sở đưa công nghệ SNF ứng dụng vào thực tiễn tại các nhà máy xử lý nước.

Từ khóa: Màng lọc nano; màng lọc nano đặt ngập; chất hữu cơ tự nhiên; xử lý nước cấp; xử lý nước mặt.

ABSTRACT

The increasing concentration of natural organic matter (NOM) and emerging micropollutants in Vietnam's surface water sources poses significant challenges to safe water supply operations and the protection of public health. Most water treatment plants currently rely on conventional treatment technologies, which are ineffective in adequately removing these specific pollution sources. This reality necessitates the research and application of advanced water treatment technologies to upgrade existing systems and adapt to the increasingly severe degradation of surface water quality. Nanofiltration (NF) is recognized as a highly effective alternative technology for organic pollutant removal due to its superior selectivity. Specifically, NF membranes in a submerged flat-sheet (SNF) configuration have been proven to remove 70–90% of organic matter, provide excellent turbidity control, and effectively eliminate odorous compounds and micropollutants such as PFAS, all while consuming significantly less energy than traditional pressurized NF systems. This paper provides a comprehensive review of SNF membrane technology in the treatment of contaminated surface water for domestic use, drawing on pioneering studies from Japan. It further analyzes the application prospects of SNF technology for treating organic-polluted surface water in the specific context of Vietnam. Furthermore, the study identifies critical challenges and scientific research gaps that must be addressed to provide a solid foundation for the practical implementation of SNF technology in water treatment facilities.

Keywords: Nanofiltration; submerged nanofiltration; natural organic matter; drinking water treatment; surface water treatment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự khan hiếm nước sạch và ô nhiễm nguồn nước trên quy mô toàn cầu đang là những thách thức nghiêm trọng đối với xã hội hiện đại. Tại nhiều quốc gia, trong đó có Việt Nam, nước mặt (sông, hồ, đập) vẫn là nguồn cung cấp nước sinh hoạt chủ yếu, nhưng chất lượng nguồn nước này đang bị đe dọa nghiêm trọng bởi sự gia tăng của chất hữu cơ tự nhiên (NOM) và các vi ô nhiễm hữu cơ mới nổi [1], [2]. NOM không chỉ gây ra các vấn đề về màu, mùi và vị mà còn là tiền chất chính hình thành các sản phẩm phụ khử trùng (DBPs) gây ung thư và đột biến gen, như trihalomethanes (THMs), trong quá trình khử trùng bằng clo [3], [4], [5], [6].

Hiện nay, dây chuyền công nghệ xử lý nước cấp cho sinh hoạt với nguồn nước mặt ở Việt Nam chủ yếu là các công nghệ truyền thống, được áp dụng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới từ những năm đầu thế kỷ 20 đến nay, đó là clo hóa sơ bộ, keo tụ, lắng, lọc cát, khử trùng [2], [7]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng công nghệ truyền thống thường không hiệu quả trong việc loại bỏ các tiền chất hữu cơ có hại này [3], [8], [9]. Điều này đã đặt ra những yêu cầu cấp bách về việc cần thiết phải nâng cấp, cải tiến các công nghệ xử lý nước hiện hữu để đáp ứng sự suy thoái nguồn nước mặt hiện nay.

Trong số các công nghệ xử lý tiên tiến, màng NF nổi lên như một giải pháp ưu việt với kích thước lỗ rỗng đặc trưng từ 0,5-2 nm. Màng NF có khả năng loại bỏ vượt trội các chất hữu cơ hòa tan, vi khuẩn, virus và các ion đa hóa trị, đồng thời có lợi thế đặc biệt là giữ lại được các ion khoáng thiết yếu cho sức khỏe con người, điều mà màng thẩm thấu ngược (RO) thường loại bỏ hoàn toàn [10], [11]. Tuy nhiên, trong nhiều thập kỷ, màng NF thương mại chủ yếu được sản xuất dưới cấu hình quấn xoắn (spiral-wound) [12]. Cấu hình này với kênh dẫn dòng cực hẹp (~0,5 mm) rất dễ bị tắc nghẽn (fouling) bởi độ đục và chất hữu cơ cao, đòi hỏi quy trình tiền xử lý phức tạp (như UF, MF hoặc lọc cát) và chi phí năng lượng vận hành cao (5-20 bar) đã hạn chế khả năng áp dụng rộng rãi của công nghệ màng NF truyền thống [13].

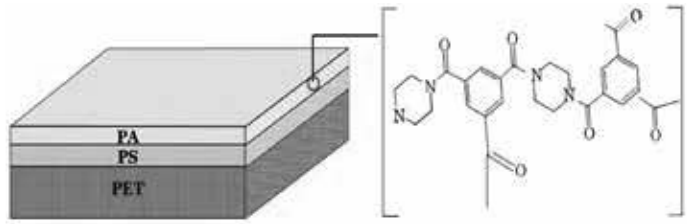
Sự ra đời của công nghệ màng lọc nano đặt ngập (Submerged Nanofiltration - SNF) từ năm 2020 đã mở ra một hướng đi mang tính đột phá trong việc tìm kiếm giải pháp công nghệ xử lý nước mặt ô nhiễm chất hữu cơ [11], [14]. Khác với cấu hình truyền thống, màng SNF tấm phẳng được ngâm trực tiếp vào bể chứa và vận hành bằng lực hút chân không với áp suất xuyên màng (TMP) thấp dưới 1 bar. Cấu hình này cho phép xử lý trực tiếp nước mặt ô nhiễm mà không cần các bước tiền xử lý phức tạp. Ngoài ra, do SNF hoạt động ở lưu lượng thấp (<10 L/m^{2}h) nên giảm khả năng tắc nghẽn, đồng thời dễ dàng vệ sinh phục hồi tính thấm [8], [11].

Nghiên cứu tổng quan này nhằm đánh giá hiệu quả xử lý NOM và các vi ô nhiễm đặc thù trong nguồn nước mặt của hệ thống SNF, dựa trên các nghiên cứu tiên phong tại Nhật Bản. Mục tiêu cốt lõi là nhận diện tiềm năng ứng dụng của công nghệ này, đồng thời chỉ ra những thách thức khoa học còn tồn tại khi áp dụng cho điều kiện nguồn nước mặt đặc thù tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cái nhìn hệ thống và định hướng cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo, làm cơ sở khoa học cho việc chuyển hóa tiềm năng của công nghệ SNF thành giải pháp áp dụng tại các nhà máy nước ở Việt Nam.

2. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA MÀNG LỌC NANO ĐẶT NGẬP

2.1. Đặc điểm màng, cấu tạo

- Đặc điểm màng



Hình 1. Cấu trúc của màng NF270 (PA-polyamide, PS-polysulfone, PET-polyester) [15]

Màng lọc nano (NF) hiện đại, bao gồm cả cấu hình đặt ngập, chủ yếu sở hữu cấu trúc phức hợp mỏng (Thin-film composite - TFC) đặc trưng [10]. Cấu trúc này thường bao gồm ba lớp vật liệu khác nhau được tối ưu hóa độc lập để đảm bảo cả hiệu suất tách lọc và độ bền cơ học:

+ Lớp chọn lọc (Active/Selective layer): Đây là lớp trên cùng, mỏng nhất (thường từ 10-300 nm, nhưng có thể đạt mức siêu mỏng 14-42 nm nhờ các kỹ thuật tiên tiến), quyết định khả năng rào cản của màng. Vật liệu phổ biến nhất là Polyamide (PA), được tạo ra thông qua phản ứng trùng hợp giao diện (IP) giữa các monomer như piperazine (PIP) và trimesoyl chloride (TMC). Lớp này chứa các lỗ rỗng kích thước tiểu nano (interconnected sub-nanometric pores) từ 0,5 đến 2,0 nm [3].

+ Lớp hỗ trợ xốp (Porous substrate layer): Thường được làm từ Polysulfone (PS) hoặc Polyethersulfone (PES) với độ dày khoảng 30-50 m. Lớp này có cấu trúc lỗ rỗng lớn hơn, đóng vai trò giảm thiểu lực cản dòng chảy đồng thời là nền tảng để lớp PA bám dính [1].

+ Lớp đế vải không dệt (Non-woven support): Thường là Polyester (PET), cung cấp sức bền cơ học cần thiết để màng có thể vận hành ổn định dưới các tác động vật lý và áp suất [16].

Các nghiên cứu thường sử dụng ba loại màng thương mại từ nhà sản xuất DuPont/FilmTec (NF90, NF270) và Nitto Denko (ESNA5) để chế tạo module SNF:

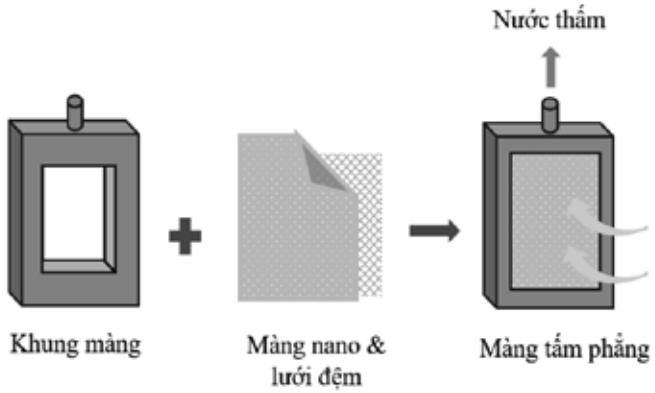
+ Màng NF270 (NF lỏng): Là màng Polypiperazine-amide. Đặc điểm là có độ thấm nước cao (11,5-14 LMH/bar) và ngưỡng cắt khối lượng phân tử (MWCO) khoảng 300 Da [17], [18].

+ Màng NF90 (NF chặt): Là màng Polyamide chặt hơn với MWCO khoảng 200 Da. Loại này cho chất lượng nước sau lọc tốt hơn nhưng yêu cầu áp suất vận hành cao hơn và dễ tắc nghẽn hơn so với NF270 [17].

+ Màng ESNA5 (sản xuất bởi Hydranautics/Nitto Denko Co., Nhật Bản): loại màng mỏng phức hợp (TFC) có lớp hoạt tính được làm từ Polyamide có giá trị MWCO trên 400 Da [19].

Cấu tạo màng phẳng

Trong hệ thống SNF, các tấm màng phẳng này được dán hoặc gắn cố định vào một khung nhựa để tạo thành các module màng tấm phẳng [11].



Hình 2. Cấu tạo màng nano tấm phẳng

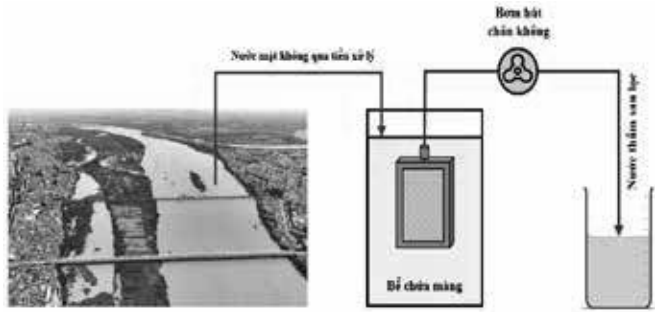
2.2. Nguyên lý làm việc và cơ chế tách màng của SNF

- Nguyên lý làm việc

Hệ thống SNF sử dụng nguyên lý dòng lọc từ ngoài vào trong (outside-in). Các tác nhân gây bẩn và chất ô nhiễm bị giữ lại phía ngoài bề mặt màng hoặc trong bể ngập, trong khi nước sạch đi xuyên qua lớp PA và lớp hỗ trợ để đi vào hệ thống thu gom trung tâm. Động lực thúc đẩy quá trình lọc là áp suất xuyên màng (TMP) thấp, thường dưới 1 bar và có thể thấp tới mức < 0,5 bar [20]. Áp suất này được tạo ra bởi một bơm hút chân không kết nối với đường ống thu nước thấm hoặc đơn giản là nhờ chênh lệch cột áp trọng lực.

- Cơ chế tách

Khả năng tách lọc của màng SNF được quyết định bởi sự phối hợp của ba cơ chế [21]:



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của hệ thống lọc SNF

+ Sàng lọc kích thước (Steric Exclusion): Với lỗ màng đặc trưng 1,0-2,0 nm (MWCO từ 200-1000 Da), màng chặn đứng các chất hữu cơ đại phân tử, biopolymer và vi khuẩn dựa trên kích thước vật lý.

+ Đẩy tĩnh điện (Donnan Exclusion): Trong môi trường nước mặt (pH từ 6-8), bề mặt màng tích điện âm sẽ đẩy các anion và hợp chất hữu cơ tích điện âm (như acid humic/fulvic), đồng thời giữ lại các cation đa hóa trị để cân bằng điện tích.

+ Loại trừ điện môi (Dielectric Exclusion): Sự khác biệt về hằng số điện môi giữa dung dịch và vật liệu màng tạo ra rào cản năng lượng, ngăn cản các ion đi vào lỗ màng nano, giúp tăng cường hiệu quả tách muối đa hóa trị.

Sự kết hợp này tạo nên đặc tính chọn lọc độc đáo: loại bỏ hầu hết các chất hữu cơ hòa tan (DOC) và vi ô nhiễm nhưng vẫn cho phép một phần khoáng chất có lợi đi qua [15]. Đặc biệt, dưới tác động của TMP thấp, các chất bẩn chỉ hình thành một lớp cặn bám xốp (fluffy cake layer), giúp bảo toàn tính thấm và cơ chế tách lọc trong thời gian dài [17].

3. HIỆU QUẢ XỬ LÝ NƯỚC MẶT Ô NHIỄM CỦA MÀNG LỌC NANO ĐẶT NGẬP

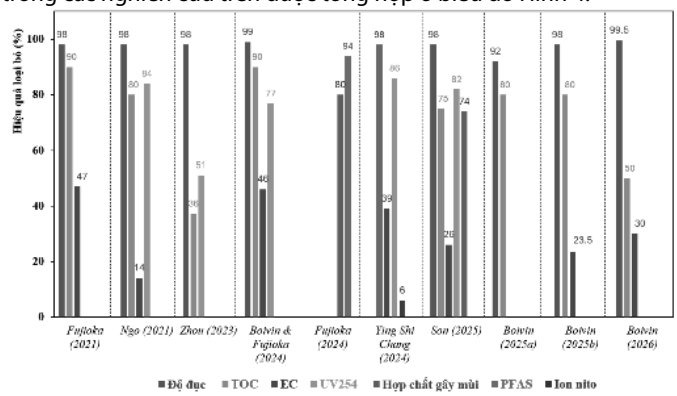
3.1. Hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm

Thông qua các kết quả nghiên cứu tiên phong được thực hiện bởi Takahiro Fujioka và cộng sự tại Đại học Nagasaki, Nhật Bản [11], [14], [22] tiềm năng ứng dụng SNF để xử lý nước mặt bị ô nhiễm đã được chứng minh. Hệ thống SNF không chỉ cho thấy tính ổn định về vận hành mà còn mang lại hiệu suất tách vượt trội, đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe về nước uống mà các công nghệ truyền thống khó lòng đạt được. Các nghiên cứu thực nghiệm đã thực hiện và kết quả chính đạt được tổng hợp theo Bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu ứng dụng SNF trong xử lý nước mặt ô nhiễm

Tác giả (Năm)	Quốc gia	Mục tiêu của nghiên cứu	Kết quả nghiên cứu đạt được	Trích dẫn
Fujioka và cs (2021)	Nhật Bản	Đánh giá hiệu quả của màng NF tấm phẳng đặt ngập (SNF) xử lý nước uống trực tiếp không cần tiền xử lý	Tỷ lệ loại bỏ màu và hữu cơ ổn định > 80%; TMP chỉ tăng 3 kPa trong 35 ngày. Nước sau xử lý đạt tiêu chuẩn nước uống chất lượng cao	[11]
Ngo và cs (2021)	Nhật Bản	Đánh giá khả năng xử lý trực tiếp nước thải sau xử lý bậc hai bằng màng SNF ở lưu lượng thấp để giảm tắc nghẽn	Tắc nghẽn màng không đáng kể trong 48 ngày (TMP tăng < 0,072 kPa/ngày). Loại bỏ màu > 93%, TOC > 67%	[20]
Zhou và cs (2023)	Trung Quốc	Phát triển quy trình lọc NSF không qua tiền xử lý nước mặt, ít bảo trì phục vụ cho xử lý nước phi tập trung giảm thiểu tối đa năng lượng tiêu thụ	Vận hành liên tục 330 ngày ở lưu lượng thấm 2 l/m2.h mà không cần vệ sinh nhờ cơ chế tự làm sạch của lớp vi sinh vật. Giảm 83% phát thải carbon so với hệ thống NF truyền thống.	[8]
Boivin & Fujioka (2024)	Nhật Bản	Đánh giá hiệu quả của hệ thống SNF trong việc xử lý trực tiếp nước mặt ô nhiễm hữu cơ để sản xuất nước uống. Xác định cơ chế tắc nghẽn và điều khiển tắc nghẽn.	Vận hành 100 ngày; màng chặt (NF90) cho hiệu suất loại bỏ DOC và các hợp chất gây mùi > 95%. Cơ chế tắc nghẽn là sự hình thành lớp cặn bám xốp có lực cản thủy lực thấp. Lau bọt biển giúp phục hồi gần 100% tính thấm màng NF270	[17]
Fujioka và cs (2024)	Nhật Bản	Làm rõ ảnh hưởng của các nhóm chức hữu cơ đến khả năng loại bỏ 9 loại PFAS trong hệ thống SNF xử lý nước mặt	Hiệu suất loại bỏ PFAS đạt 71 - 94%. Các PFAS có nhóm carboxyl bị loại bỏ tốt hơn nhóm sulfo nhờ đẩy tĩnh điện.	[23]
Chang và cs(2024)	Nhật Bản	Xác định tiềm năng của SNF trong việc loại bỏ đồng thời các hợp chất gây mùi và ion Nitơ (NH^+_4, NO^-_2, NO_3^-) trong nước mặt ô nhiễm	Màng chặt (NF90, p-ESNA) loại bỏ mùi đạt 89-98%. Loại bỏ ion Nitơ thấp (7-39%) do hiệu ứng đẩy Donnan. Màng lỏng NF270 cho kết quả loại bỏ Nitơ âm.	[24]
Son và cs (2025)	Nhật Bản	Đánh giá hiệu quả và tối ưu hóa thời gian làm sạch màng SNF bằng vi bong bóng (Micro-nanobubbles-MNBs) của hệ SNF	Rửa bằng MNBs trong 90 phút phục hồi 100% tính thấm trong 4 chu kỳ đầu. Duy trì loại bỏ DOC > 74% ổn định suốt 49 ngày	[25]
Boivin và cs (2025a)	Nhật Bản	Đánh giá hiệu quả tiền keo tụ bằng Chùm ngây (Moringa oleifera-MO) và sục rửa thủy lực để giảm tắc nghẽn cho hệ thống SNF	MO giúp giảm độ đục từ 8-12 xuống 1-2 NTU. Sục rửa thủy lực phục hồi gần như hoàn toàn TMP khi có tiền keo tụ bằng MO	[26]
Boivin và cs (2025b)	Nhật Bản	So sánh hiệu quả tiền xủ lý bằng keo tụ $FeCl_3$ và Sắt polysilicate (PSI) trong việc giảm nhẹ tắc nghẽn màng SNF	PSI giúp giảm mạnh tốc độ tăng TMP (chỉ tăng 7 kPa trong 15 ngày) nhờ hình thành lớp bánh lọc xốp có lực cản thấp.	[22]
Boivin và cs (2026)	Nhật Bản	Đánh giá tính khả thi của việc tái cấu hình các module quấn xoắn thương mại (ESNA5) thành dạng đặt ngập.	Hệ thống đạt tiêu chuẩn nước uống với mức năng lượng cực thấp (116 Wh/m^3). Độ đục nước sau lọc < 0,01 NTU.	[19]

Hiệu quả loại bỏ các chất ô nhiễm trong nước mặt của SNF trong các nghiên cứu trên được tổng hợp ở biểu đồ Hình 4.



Hình 4. Tổng hợp hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm trong nước mặt của hệ thống SNF trong các nghiên cứu

Nhìn chung, hệ thống SNF đã cho thấy hiệu quả xử lý cao đối với các chất ô nhiễm đặc thù trong nước mặt. Mặc dù không qua tiền xử lý, hệ thống SNF vẫn hoạt động ổn định, nước thấm sau lọc đạt tiêu chuẩn chất lượng nước uống, bất chấp sự biến động của nguồn nước đầu vào (độ đục, hàm lượng hữu cơ). Cụ thể:

+ Loại bỏ chất hữu cơ (NOM): SNF có khả năng loại bỏ màu và các hợp chất hữu cơ (TOC/DOC) rất cao, thường đạt từ 70-90%. Với màng chặt như NF90 hoặc ESNA-5 có thể duy trì mức loại bỏ DOC ổn định trên 90%.

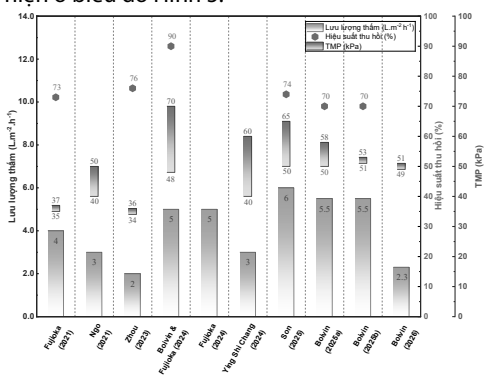
+ Kiểm soát độ đục: Nước sau lọc luôn duy trì độ đục ổn định < 0,1 NTU, bất kể độ đục nước nguồn cao hay biến động theo mùa.

+ Vi ô nhiễm hữu cơ và hợp chất gây mùi: SNF loại bỏ hiệu quả các hợp chất gây mùi như Geosmin và 2-MIB (> 95% với màng chặt) và các chất bền vững như PFAS (71-94%) thông qua cơ chế sàng lọc kích thước và đẩy tĩnh điện.

+ Loại bỏ ions: khác với màng RO loại bỏ gần như toàn bộ muối, SNF có độ thẩm thấu chọn lọc đối với các ion hóa trị một (Na^+, Cl^-) và loại bỏ tốt các ion đa hóa trị (Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}) và kim loại nặng như Cd^{2+}, Cr^{3+} (Al^{3+} > 90%). Tỷ lệ loại bỏ độ dẫn điện (EC) thường dao động từ 10-47%, giúp giữ lại một phần khoáng chất có lợi trong nước uống. Tuy nhiên do vận hành ở áp suất thấp và cấu tạo của màng nano khả năng loại bỏ các ion Nitơ (NH^+_4, NO^-_2, NO_3^-) khá thấp (7-39%) thậm chí có hiện tượng loại bỏ âm do hiệu ứng đẩy Donnan.

3.2. Thông số vận hành của hệ thống SNF

Các thông số vận hành hệ thống SNF bao gồm: lưu lượng thấm (l/m2.h), áp suất xuyên màng (TMP- kPa), hiệu suất thu hồi (%), mức độ tiêu thụ năng lượng (kWh/m3). Thông qua tổng hợp các nghiên cứu ở Bảng 1, các thông số vận hành hệ thống SNF(lưu lượng thấm, hiệu suất thu hồi) của 3 loại màng sử dung trong các thí nghiệm được thể hiện ở biểu đồ Hình 5.

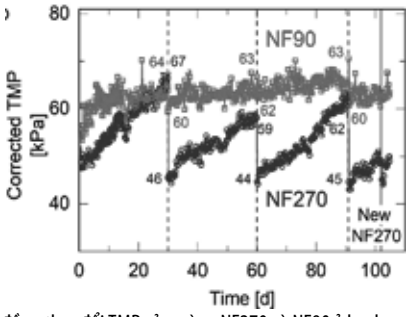


Hình 5. Tổng hợp các thông số vận hành hệ thống SNF xử lý nước mặt trong các nghiên cứu

+ Lưu lượng thấm và áp suất xuyên màng: Lưu lượng thấm trong các nghiên cứu duy trì trong dải thấp từ 2.0- 6.0 l/m^2.h. Với dải lưu lượng thấm này thì áp suất xuyên màng rất thấp (TMP < 100 kPa), cho phép vận hành bằng bơm hút chân không với công suất nhỏ.

+ Hiệu suất thu hồi: Các nghiên cứu thực nghiệm trên nguồn nước mặt của hệ thống SNF thiết kế có hiệu suất thu hồi cao trong khoảng 70-76%. Trong một số cấu hình hệ thống tích hợp tỷ lệ này có thể lên tới 90%. Tỷ lệ này thường cao hơn hoặc tương đương với các hệ thống NF áp lực truyền thống nhưng với quy trình đơn giản hơn nhiều.

+ Tiêu thụ năng lượng: Nhờ loại bỏ hệ thống bơm cao áp và các công đoạn tiền xử lý phức tạp, SNF có thể giảm tới 83% lượng phát thải carbon so với hệ thống NF áp lực truyền thống. Mức tiêu thụ năng lượng đặc tính (SEC) có thể thấp tới 0.116 kWh/m^3, tương đương với màng lọc UF nhưng cung cấp chất lượng nước của màng NF cao cấp.



Hình 6. Biểu đồ sự thay đổi TMP của màng NF270 và NF90 ở lưu lượng thấm 2.5 L/m2.h (NF90) và 5.0 L/m2.h (NF270) với nhiệt độ nguồn nước cấp vào tại 25^{0}C [17]

3.3. Kiểm soát tắc nghẽn và biện pháp vệ sinh màng

Khác biệt lớn nhất của hệ thống SNF so với màng NF áp lực cao là cấu trúc của lớp bẩn tích tụ trên bề mặt.

+ Lớp cặn không bị nén chặt: Dưới tác động của TMP thấp (< 100 kPa), các cặn bám như biopolymer, acid humic và các hạt lơ lửng hình thành một lớp bánh cặn xốp, cấu trúc lỏng lẻo, có lực cản thủy lực thấp từ đó giảm thiểu sự tắc nghẽn.

+ Tính thuận nghịch vật lý: Do không bị nén chặt bởi áp suất lớn, lớp cặn này có lực cản thủy lực thấp và không bám dính sâu. Điều này cho phép dòng nước đi qua ổn định hơn và quan trọng nhất là lớp cặn này có thể bị đánh bật hoàn toàn bằng các biện pháp vật lý nhẹ nhàng hiệu quả như lau bọt biển, xả thủy lực, sục vi bọt khí nano (MNBs) thay vì phải dùng đến quy trình rửa hóa chất (CIP) phức tạp.

+ Tiền keo tụ: Sử dụng các chất keo tụ tự nhiên (như Moringa) hoặc sắt Polysilicate (PSI) giúp loại bỏ bớt độ đục và hạt lơ lửng, tạo ra lớp bảo vệ khiến lớp bám bẩn trên màng trở nên xốp hơn, từ đó tăng hiệu suất cho các bước sục rửa thủy lực.

4. TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG VÀ THÁCH THỨC TRIỂN KHAI CÔNG NGHỆ TẠI VIỆT NAM

4.1. Tiềm năng ứng dụng công nghệ SNF

Thông qua tổng quan các nghiên cứu ở trên, hệ thống SNF đã cho thấy hiệu quả cao trong việc loại bỏ đồng thời nhiều loại chất ô nhiễm: chất hữu cơ (giảm nguy cơ tạo DBP), độ cứng (làm mềm nước), và các vi chất ô nhiễm mới nổi đáng lo ngại như PFAS và các hợp chất gây mùi với các nguồn nước mặt ô nhiễm phức tạp mà không cần tiền xử lý. Ngoài ra với quy trình hệ thống vận hành đơn giản, chi phí năng lượng thấp đáng kể so với hệ thống NF truyền thống, hệ thống SNF còn giảm chi phí hóa chất rửa màng, từ đó giảm chi phí vận hành và tác động tiêu cực đến môi trường. Từ những ưu điểm này cùng với tình trạng suy thoái các nguồn nước mặt cấp cho các nhà máy ở nước ta đã đề cập ở trên. Công nghệ SNF thực sự có tiềm năng trở thành giải pháp công nghệ hiệu quả trong hoạt động cấp nước an toàn trong thời gian tới ở Việt Nam.

4.2. Thách thức triển khai công nghệ tại Việt Nam

Nghiên cứu công nghệ SNF bước đầu cho thấy tiềm năng rất lớn để áp dụng vào thực tiễn sản xuất cung cấp nước sinh hoạt trong điều kiện suy thoái nguồn nước mặt hiện nay. Tuy nhiên, để công nghệ này có đầy đủ cơ sở ứng dụng rộng rãi vào các nhà máy cấp nước sạch ở Việt Nam, một số thách thức và hạn chế sau cần được tiếp tục nghiên cứu và giải quyết:

- Nghiên cứu thực nghiệm với nguồn nước mặt và điều kiện tại Việt Nam

Các nghiên cứu đã thực hiện tại Nhật Bản hệ thống SNF có khả năng xử lý trực tiếp nguồn nước từ các hồ, đập có độ đục thấp (<5 NTU) và DOC ổn định (1.3-2.2 mg/L) ở dải thông lượng 2.0-5.0 LMH. Tuy nhiên, khi đối mặt với nguồn nước ô nhiễm hơn (độ đục ~20,3 NTU) hoặc biến động theo mùa, thông lượng suy giảm nhanh và chỉ ổn định ở mức rất thấp (0,5-0,7 LMH). Ngược lại, nước mặt tại các hệ thống sông lớn của Việt Nam (như sông Hồng, sông Mekong) có độ đục biến động mạnh theo mùa lũ, thường kèm theo hàm lượng hữu cơ và ô nhiễm vi sinh cao. Ngoài ra, nhiệt độ nước mặt tại Việt Nam thường xuyên >25°C, trái ngược với điều kiện nước lạnh (7-11°C) trong các nghiên cứu Pilot tại Nhật. Những khác biệt này chắc chắn sẽ làm thay đổi động học, khả năng thấm cũng như hiệu suất của màng. Do đó cần có các nghiên cứu chứng thực khả năng làm việc của màng SNF với đặc điểm và điều kiện tại Việt Nam.

- Thời gian và quy mô thực nghiệm: Đa số các kết quả thực nghiệm hiện có tập trung vào quy mô phòng thí nghiệm với thời gian vận hành ngắn ngày (từ 24 đến 48 ngày). Mặc dù đã có nghiên cứu dài 330 ngày, nhưng đó là ở quy mô phòng thí nghiệm với lưu lượng cực thấp (2 LMH). Việc thiếu các thử nghiệm ở quy mô Pilot dài hạn (> 6 tháng) khiến việc theo dõi, đánh giá đầy đủ hiệu quả xử lý cũng như sự ổn định hệ thống trong thời gian dài ở hiện trường còn bỏ ngỏ.

- Chuẩn hóa thông số vận hành của hệ thống: Hiện nay, các thông số vận hành hệ thống SNF là lưu lượng thấm (2.0-6.0 LMH) và hiệu suất thu hồi (70-76%) chủ yếu được lựa chọn theo kinh nghiệm hoặc điều kiện cụ thể của từng thí nghiệm riêng lẻ. Cần có các nghiên cứu định lượng trên các nguồn nước tại Việt Nam để xác lập vùng thông số vận hành tối ưu, nhằm cân bằng giữa kiểm soát tắc nghẽn, duy trì lưu lượng thấm và hiệu quả chi phí vận hành cho các nhà máy ở quy mô lớn.

- Tối ưu chu trình vệ sinh màng: Các biện pháp vật lý như lau bọt biển hay MNBs đã chứng minh được hiệu quả phục hồi tính thấm tức thời của màng sau khi làm sạch. Tuy nhiên, dữ liệu nghiên cứu cho thấy hiệu quả làm sạch bằng lau bọt biển hay MNBs suy giảm sau một vài chu kỳ do sự tích tụ cặn bẩn nén chặt. Bởi vậy cần nghiên cứu để tối ưu hóa chu trình vệ sinh nhằm giảm thiểu chi phí vận hành và kéo dài tuổi thọ màng, giảm thiểu lượng hóa chất phát thải ra nguồn tiếp nhận từ đó khẳng định tính thân thiện môi trường của công nghệ SNF.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H Guo, L Xi, W Yang, Z Yao, Y Mei, L Peng et al. Nanofiltration for drinking water treatment: a review. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2022, pp. 681-698, doi: 10.1007/s11705-021-2103-5.

[2] Nguyễn Việt Anh. Công nghệ cấp nước mới và ứng dụng ở Việt Nam. Tạp chí Cấp thoát nước Việt Nam, số 177-178, 2025.

[3] M Sillanpää, MC Ncibi, A Matilainen and M Vepsäläinen. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. Chemosphere, vol. 190, pp. 54-71, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.113.

[4] A Knap-Bałdyga and M Żubrowska-Sudoł. Natural organic matter removal in surface water treatment via coagulation: Current issues, potential solutions, and new findings. Sustainability, vol. 15, 2023, doi: 10.3390/su151813853.

[5] SS Marais, EJ Ncube, TAM Msagati, BB Mamba and TTI Nkambule. Comparison of natural organic matter removal by ultrafiltration, granular activated carbon filtration and full scale conventional water treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 6, no. 5, pp. 6282-6289, Oct 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.10.002.

[6] S Tak and BP Vellanki. Natural organic matter as precursor to disinfection byproducts and its removal using conventional and advanced processes: State of the art review. Journal of Water and Health, vol. 16, no. 5, pp. 681-703, Oct 2018, doi: 10.2166/wh.2018.032.

[7] Đào Thị Minh Nguyệt. Nghiên cứu giải pháp xử lý đồng thời các chất ô nhiễm hữu cơ, amoni và mangan trong nước mặt sử dụng bể lọc sinh học tiếp xúc. Đề tài nghiên cứu khoa học Bộ Xây dựng, Hà Nội, 2024.

[8] C Zhou, Y Luo, K Xiong and S Shao. A low-maintenance process for decentralized water purification using nanofiltration operated at ultralow flux. Separation and Purification Technology, vol. 327, 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2023.124869.

[9] C Guo et al. From irreversible to reversible: Systematic pretreatment strategies mitigate nanofiltration membrane fouling in drinking water production by altering fouling mechanisms. Desalination, vol. 620, 2026, doi: 10.1016/j.desal.2025.119620.

[10] X Cheng et al. Tailored ultra-low pressure nanofiltration membranes for advanced drinking water treatment. Desalination, vol. 548, 2023, doi: 10.1016/j.desal.2022.116264.

[11] T Fujioka et al. Submerged nanofiltration without pre-treatment for direct advanced drinking water treatment. Chemosphere, vol. 265, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129056.

[12] WA Jonkers, ER Cornelissen and WM de Vos. Hollow fiber nanofiltration: From lab-scale research to full-scale applications. Journal of Membrane Science, 2023, doi: 10.1016/j.memsci.2022.121234.

[13] A Yuksekdag et al. Upgrading of conventional water treatment plant by nanofiltration for enhanced organic matter removal. Separation and Purification Technology, vol. 325, 2023, doi: 10.1016/j.seppur.2023.124766.

[14] TM Son, YS Chang, K Kamada, S Boivin and T Fujioka. Micro-nanobubbles for removing membrane foulants from the surface of nanofiltration membranes in drinking water applications. Separation and Purification Technology, vol. 377, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.134259.

[15] W Tomczak. The application of the nanofiltration membrane NF270 for separation of fermentation broths. Membranes, vol. 12, no. 12, 2022, doi: 10.3390/membranes12121263.

[16] H Guo et al. Nanofiltration for drinking water treatment: a review. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2022, doi: 10.1007/s11705-021-2103-5.

[17] S Boivin and T Fujioka. Membrane fouling control and contaminant removal during direct nanofiltration of surface water. Desalination, vol. 581, 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117607.

[18] W Tomczak. Fouling of the nanofiltration membrane NF270 used for separation of fermentation broths: Impact of feed pretreatment process. Processes, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/pr11030817.

[19] S Boivin et al. Direct nanofiltration treatment using flat-sheet membrane modules reconfigured from spiral-wound elements. Environmental Technology and Innovation, vol. 41, 2026, doi: 10.1016/j.eti.2025.104678.

[20] MTT Ngo et al. Fouling behavior and performance of a submerged flat-sheet nanofiltration membrane system for direct treatment of secondary wastewater effluent. Journal of Water Process Engineering, vol. 41, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.101991.

[21] N Maroufi and N Hajilary. Nanofiltration membranes types and application in water treatment: a review. Sustainable Water Resources Management, vol. 9, no. 5, 2023, doi: 10.1007/s40899-023-00899-y.

[22] S Boivin et al. Pre-coagulation of surface water for mitigating membrane fouling during submerged nanofiltration. Desalination, vol. 612, 2025, doi: 10.1016/j.desal.2025.118959.

[23] T Fujioka et al. Effects of functional groups of polyfluoroalkyl substances on their removal by nanofiltration. Water Research X, vol. 24, 2024, doi: 10.1016/j.wroa.2024.100233.

[24] YS Chang, S Boivin and T Fujioka. Removal of odorous and nitrogen chemicals by submerged nanofiltration. Journal of Water Process Engineering, vol. 68, p. 106377, 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.106377.

[25] TM Son et al. Micro-nanobubbles for removing membrane foulants from the surface of nanofiltration membranes in drinking water applications. Separation and Purification Technology, vol. 377, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.134259.

[26] S Boivin, T Okuda and T Fujioka. Effects of Moringa oleifera-based pre-coagulation and hydraulic flushing on the reduction of submerged nanofiltration membrane fouling. Desalination and Water Treatment, vol. 323, 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101249.

■Ngày nhận bài: 12/3/2026 ■Ngày sửa bài: 19/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Đánh giá ứng dụng cọc đá trong cải thiện khả năng chống hóa lỏng của nền đất cát: Bằng chứng thực nghiệm và các thách thức nghiên cứu

Stone columns for liquefaction mitigation in sandy soils: Experimental evidence and research challenges

> TS TRẦN ĐỒNG KIẾM LAM[1,*], THS NGUYỄN ĐỨC KHIÊM[2]
[1]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]Khoa Khoa học cơ bản, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây
[*]Email: lam.trandongkiem@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Trong số các giải pháp cải tạo nền chống hóa lỏng, cọc sỏi (GC) đã được ứng dụng rộng rãi nhờ hiệu quả kỹ thuật và tính khả thi trong thi công. Bài báo này tổng hợp và đánh giá hệ thống các nghiên cứu hiện trường, thí nghiệm mô hình, thí nghiệm trong phòng và mô phỏng số liên quan đến hiệu quả giảm hóa lỏng của GC. Trên cơ sở tổng quan, ba cơ chế làm việc chính của hệ GC dưới tải trọng chu kỳ được xác định gồm: (i) cơ chế thoát nước, (ii) cơ chế đầm chặt, và (iii) cơ chế gia cường và tái phân bố ứng suất. Đồng thời, bài báo chỉ ra các khoảng trống nghiên cứu quan trọng, đặc biệt là sự thiếu hụt các thí nghiệm phần tử dưới tải trọng chu kỳ như thí nghiệm cắt đơn theo chu kỳ (CDSS), cũng như nhu cầu kiểm chứng các mô hình số bằng dữ liệu thực nghiệm. Các định hướng nghiên cứu trong tương lai được đề xuất nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và hướng tới xây dựng các hướng dẫn thiết kế thống nhất cho hệ GC trong điều kiện động đất.

Từ khóa: Hóa lỏng đất; cọc sỏi; cột đá; động đất.

ABSTRACT

Among ground improvement techniques for liquefaction mitigation, gravel columns (GC) have been widely adopted due to their technical effectiveness and constructability. This paper presents a systematic review of field observations, physical model tests, laboratory experiments, and numerical simulations related to the liquefaction mitigation performance of GC-improved ground. Based on the synthesis of previous studies, three primary mechanisms governing the cyclic response of GC systems are identified: (i) enhanced drainage and dissipation of excess pore water pressure, (ii) soil densification, and (iii) mechanical reinforcement and stress redistribution. In addition, this review highlights key research gaps, particularly the limited availability of element-scale experimental studies under cyclic loading conditions, such as cyclic direct simple shear (CDSS) tests, as well as the need for rigorous validation of numerical models against experimental data. Future research directions are discussed with the aim of strengthening the scientific basis and supporting the development of unified design guidelines for GC systems under seismic loading.

Keywords: Soil liquefaction; gravel columns; stone columns; earthquakes.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hóa lỏng đất là một trong những dạng mất ổn định nghiêm trọng nhất của nền đất bão hòa dưới tác động của động đất, đặc trưng bởi sự suy giảm nhanh ứng suất hữu hiệu do sự tích tụ áp lực nước lỗ rỗng dư (EPWP). Quá trình này dẫn đến sự suy giảm đáng kể sức kháng cắt, gây ra các biến dạng lớn như lún, trượt ngang và mất ổn định công trình, và đã được ghi nhận rộng rãi trong nhiều trận động đất lớn trên thế giới (Hamada et al., 1996; Cubrinovski et al., 2012; Boulanger et al., 2019). Do đó, việc phát triển các giải pháp cải tạo nền nhằm giảm thiểu nguy cơ hóa lỏng vẫn là một yêu cầu cấp thiết.

Trong số các giải pháp cải tạo nền, cột sỏi (GC) được ứng dụng rộng rãi nhờ tính khả thi và hiệu quả kinh tế. Ban đầu, GC được phát triển như một giải pháp thoát nước thẳng đứng nhằm đẩy nhanh quá trình cố kết; sau đó, phương pháp này được mở rộng cho các nền có nguy cơ hóa lỏng, nơi GC đóng vai trò vừa là đường thấm có độ thấm cao [1], vừa là phần tử gia cường cơ học. Sự ra đời của các kỹ thuật tiên tiến như cột sỏi bọc vải địa kỹ thuật (EGC) [2] phản ánh sự chuyển dịch từ cách tiếp cận thuần thủy lực sang cơ chế tổng hợp, kết hợp thoát nước, đầm chặt và tái phân bố ứng suất trong hệ đất-cột (GCSS).

Mặc dù hiệu quả của GC đã được chứng minh thông qua nhiều nghiên cứu hiện trường, thí nghiệm mô hình và mô phỏng số, hiểu biết về cơ chế làm việc của hệ đất gia cố dưới tải trọng chu kỳ vẫn còn phân tán. Các phương pháp thiết kế hiện nay chủ yếu dựa trên

tương quan thực nghiệm hoặc chỉ tiêu hiện trường, trong khi mối liên hệ giữa ứng xử hóa lỏng ở quy mô công trình và hành vi ứng suất-biến dạng-áp lực nước lỗ rỗng ở cấp độ phần tử chưa được làm rõ.

Trong bối cảnh đó, bài báo này trình bày một đánh giá có phê phán về hiệu quả giảm hóa lỏng của GCSS, tập trung vào phân tích các cơ chế làm việc chủ đạo của GCSS dựa trên bằng chứng thực nghiệm và mô phỏng số. Các khoảng trống nghiên cứu được chỉ ra, đồng thời nhấn mạnh vai trò của các thí nghiệm ở mức phần tử trong nghiên cứu ứng xử GCSS.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này áp dụng phương pháp đánh giá hệ thống nhằm tổng hợp và phân tích có phê phán các công trình liên quan đến hiệu quả của GC trong giảm thiểu hóa lỏng đất cát dưới tác động động đất. Tài liệu được thu thập từ các cơ sở dữ liệu học thuật quốc tế uy tín gồm Scopus, Web of Science, ScienceDirect và Thư viện ASCE, thông qua các nhóm từ khóa liên quan đến GC và cơ chế hóa lỏng như stone/gravel columns, liquefaction mitigation, cyclic loading và pore water pressure. Chỉ các nghiên cứu cung cấp dữ liệu định lượng rõ ràng từ thí nghiệm, mô hình vật lý hoặc mô phỏng số có kiểm chứng mới được đưa vào phân tích.

Các công bố được phân loại theo phương pháp nghiên cứu, bao gồm: (i) nghiên cứu hiện trường, (ii) mô hình vật lý quy mô lớn (máy ly tâm, bàn rung), (iii) thí nghiệm trong phòng, và (iv) phân tích số sử dụng FEM, DEM hoặc mô hình liên hợp. Cách tiếp cận này cho phép so sánh chéo giữa các phương pháp khác nhau nhằm đánh giá mức độ nhất quán của các kết luận về cơ chế giảm hóa lỏng của hệ GCSS. Trên cơ sở đó, các khoảng trống kiến thức được nhận diện, làm tiền đề định hướng cho các nghiên cứu khác trong tương lai.

3. CÁC CƠ CHẾ LÀM VIỆC CHÍNH CỦA HỆ THỐNG GC DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA TẢI TRỌNG CHU KỲ

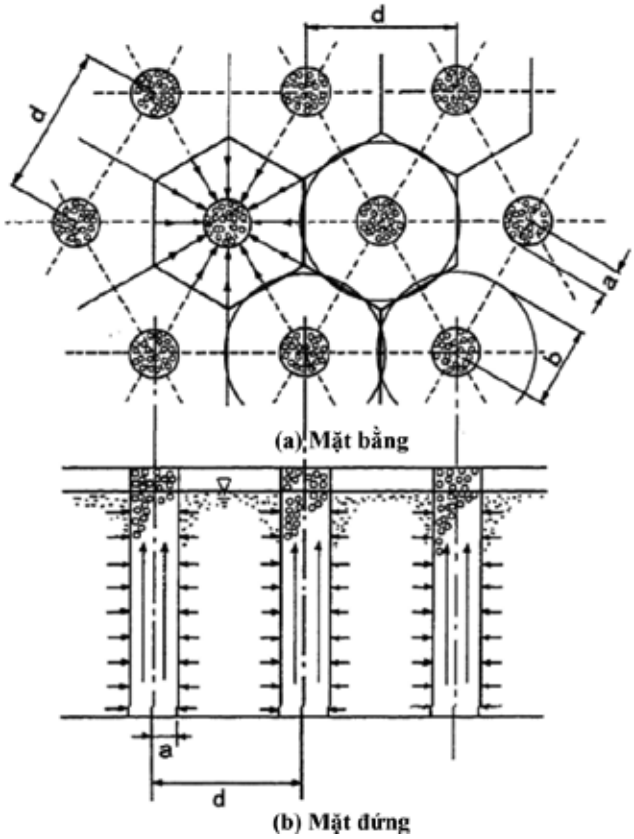
Trên cơ sở tổng hợp và phân tích, hiệu quả kháng hóa lỏng của GC có thể được quy về ba cơ chế: (i) thoát nước, (ii) đầm chặt, và (iii) gia cường và tái phân bố ứng suất.

3.1. Cơ chế thoát nước

Với cấu trúc hạt thô và hệ số thấm lớn, GC hoạt động như các giếng thoát nước thẳng đứng, tạo điều kiện cho dòng thấm xuyên tâm từ đất nền về thân cột (Hình 1). Mục tiêu của cơ chế này không phải là loại bỏ hoàn toàn EPWP, mà là duy trì tốc độ tiêu tán PWP lớn hơn hoặc tương đương với tốc độ phát sinh, qua đó ngăn cản tỷ số áp lực nước lỗ rỗng (EPWPR) tiến tới giá trị tới hạn gây mất ổn định [3], [4] (thường là 0.5 - 0.6 theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ hoặc 0.25 - 0.5 theo tiêu chuẩn Nhật Bản) [5], [6].

Hiệu quả thoát nước của GCSS phụ thuộc mạnh vào các đặc trưng vật liệu và hình học của cột (Bảng 1). Độ thấm của vật liệu lấp cột thường được yêu cầu lớn hơn đất nền từ một đến hai bậc đại lượng để đảm bảo hiệu quả tiêu tán EPWP và tránh sự tích tụ áp lực bên trong cột. Đồng thời, đường kính và khoảng cách cột quyết định chiều dài đường thoát nước xuyên tâm, yếu tố then chốt kiểm soát tốc độ tiêu tán EPWP.

Cơ chế thoát nước cũng tồn tại những hạn chế đáng kể. Hiện tượng tắc nghẽn do hạt mịn xâm nhập vào thân cột có thể làm suy giảm độ thấm và hiệu quả thoát nước theo thời gian, đòi hỏi sử dụng lớp bọc địa kỹ thuật hoặc vật liệu lọc phù hợp [1], [7]. Ngoài ra, nhiều kết quả thực nghiệm và mô hình ly tâm cho thấy hiệu quả tiêu tán EPWP của GC thường thể hiện rõ hơn trong giai đoạn sau rung động, đóng vai trò quan trọng trong quá trình phục hồi cường độ và độ cứng của nền đất, hơn là khả năng ngăn chặn hoàn toàn sự gia tăng EPWP tại thời điểm rung động cực đại [8], [9].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của GCSS thoát nước dùng trong xử lý nền đất rời bão hòa nhằm giảm nguy cơ hóa lỏng [10]

Bảng 1. Bảng tổng hợp các nghiên cứu về cơ chế tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng của GCSS

Công trình nghiên cứu	Loại thí nghiệm	Kết luận chính về cơ chế tiêu tán áp lực nước
Seed and Booker 1977 [3]	Phân tích số	GC giúp tiêu tán EPWP gần như nhanh bằng tốc độ phát sinh. Hiệu quả phụ thuộc vào khoảng cách cột để rút ngắn đường thoát nước hướng tâm.
Mitchell and Huber 1985 [11]	Case study & Phân tích số	GC giúp giảm độ lún xuống còn 30-40%. Việc sử dụng lớp đệm sỏi trên bề mặt là cần thiết để đảm bảo GC thoát nước tốt.
Baez and Martin 1992 [12]	Thí nghiệm hiện trường & Phân tích số	Sự nén chặt xảy ra do hóa lỏng có kiểm soát dưới tác động của rung động, sau đó là sự tiêu tán nhanh EPWP.
Satizabal 1995 [13]	Thí nghiệm hiện trường & Mô hình toán học	GC đóng vai trò là các giếng thoát nước xuyên tâm. Khả năng thoát nước thực tế bị ảnh hưởng bởi sự trộn lẫn hạt mịn làm giảm độ thấm của cột.
Ashford et al. 2000 [14]	Thí nghiệm hiện trường	Lắp đặt GC hạn chế sự gia tăng PWP từ việc nổ mìn và tăng đáng kể tốc độ tiêu tán EPWP sau đó.
Brennan and	Thí nghiệm mô hình ly	Vùng ảnh hưởng thoát nước mở rộng dần theo thời gian từ tâm cột ra ngoài.

Madabhushi 2002 [8]	tâm	
Adalier et al. 2003 [15]	Thí nghiệm mô hình ly tâm	Đối với đất bùn, GC không giúp tiêu tán áp lực nhanh trong lúc rung động mà chủ yếu phát huy hiệu quả sau khi rung động kết thúc.
Shenthan et al. 2004 [16]	Phân tích số	Việc bổ sung bấc thấm xung quanh GC trong đất bùn giúp tăng tốc độ tiêu tán PWP, hỗ trợ quá trình nén chặt đất nền ngay khi thi công.
Howell et al. 2012 [6]	Thí nghiệm mô hình ly tâm	Hiệu quả phụ thuộc lớn vào đặc tính sóng địa chấn (tần số, biên độ).
Pal and Deb 2018 [4]	Giải pháp giải tích & Phân tích số	Độ cứng của GC có ảnh hưởng lớn đến khả năng thoát nước; cột càng cứng thì EPWPR tối đa càng giảm (giảm từ 20-60%).
Pal and Deb 2019 [7]	Mô hình toán học	Hiện tượng tắc nghẽn do hạt mịn xâm nhập làm giảm độ thấm của cột, có thể làm tăng EPWP lên đến 50% so với trường hợp không tắc nghẽn.
Hleibieh and Herle 2020 [17]	Phân tích số	Độ thấm của vật liệu cột không thể hiện hiệu quả rõ rệt nếu PWP phát sinh quá nhanh. Sự ổn định chủ yếu đến từ việc nén chặt đất xung quanh trong quá trình thi công.
Farzalizadeh et al. 2021 [18]	Thí nghiệm bàn rung	GC có tốc độ thoát nước nhanh hơn so với các loại vật liệu thay thế như hạt cao su sau khi kết thúc rung động địa chấn.
Tai et al. 2024 [19]	Thí nghiệm mô hình	Trong điều kiện thoát nước một phần, GC giảm 60% độ lún và ngăn PWP tích tụ đến mức mất ổn định.

3.2. Cơ chế đầm chặt

Tổng hợp các kết quả nghiên cứu liên quan đến cơ chế đầm chặt được trình bày trong Bảng 2. Các kỹ thuật đầm rung sâu tạo ra các dao động tần số cao, kích thích quá trình tái sắp xếp cấu trúc hạt của đất rời, qua đó làm gia tăng mức độ chặt của các lớp đất bao quanh cột [14]. Sự cải thiện trạng thái ban đầu này dẫn đến sự gia tăng đáng kể sức kháng cắt chu kỳ nội tại của đất, đồng thời làm tăng tỷ số sức kháng chu kỳ.

Bảng 2. Bảng tổng hợp nghiên cứu về cơ chế đầm chặt của GCSS

Công trình nghiên cứu	Loại thí nghiệm	Kết luận chính về cơ chế đầm chặt
Mitchell and Huber 1985 [11]	Case study	Quá trình thi công GC bằng phương pháp đầm rung giúp tăng áp lực hông tại chỗ lên đáng kể.
Baez and Martin 1992 [12]	Thí nghiệm hiện trường	Sự đầm chặt xảy ra do rung động gây hóa lỏng có kiểm soát xung quanh đầu rung, sau đó PWP tiêu tán làm các hạt đất tái sắp xếp chặt hơn.
Satizabal 1995 [13]	Case study	Xây dựng mô hình toán học thực nghiệm dựa trên hơn 400 điểm dữ liệu SPT và 1300 điểm CPT. Hiệu quả đầm chặt giảm dần khi hàm lượng hạt mịn tăng.
Ashford et al. 2000 [14]	Thí nghiệm hiện trường	GC làm tăng đáng kể sức kháng mũi CPT (từ 4 MPa lên hơn 20 MPa), trực tiếp làm giảm khả năng hóa lỏng của lớp cát bên trên.
Slocombe et al. 2000 [20]	Case study	Đất cát có hàm lượng hạt mịn (FC) FC < 15% và hạt sét < 2% phản ứng tốt nhất với đầm rung mà không cần thêm sỏi.
Adalier et al. 2003 [15]	Thí nghiệm mô hình ly tâm	Hiệu quả cải tạo đối với đất bùn chủ yếu dựa vào sự gia cường.
Shenthan et al. 2004 [16]	Phân tích số	Hiệu quả đầm chặt tỷ lệ thuận với tỷ lệ diện tích thay thế. Trong đất cát hạt mịn, đầm chặt chỉ hiệu quả khi có thêm bấc thấm để đẩy nhanh quá trình cố kết trong lúc thi công.
Huang et al. 2016 [21]	Thí nghiệm bàn rung	Đầm chặt đất xung quanh là yếu tố quan trọng nhất trong ba cơ chế giảm thiểu hóa lỏng.
Kirsch and Kirsch 2017 [22]	Tổng hợp và Phân tích số	Đầm chặt đạt tối ưu khi tần số rung động của thiết bị gần với tần số cộng hưởng của hệ thống đất-đầu rung (thường trong khoảng 13–27 Hz).
Salem et al. 2017 [23]	Case study	N_{SPT} gia tăng từ 31% đến 69%. Việc kết hợp cơ chế đầm chặt và gia cường giúp tăng hệ số an toàn lên rất cao.
Zhou et al. 2021 [9]	Thí nghiệm mô hình ly tâm	Cơ chế đầm chặt làm tăng tính giãn nở của đất, giúp ngăn chặn sự phát sinh PWP ngay từ đầu.

Tuy nhiên, hiệu quả của cơ chế nén chặt thể hiện sự phụ thuộc rõ rệt vào thành phần hạt của đất nền, đặc biệt là FC. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hiệu quả cải thiện đạt mức cao nhất đối với cát sạch hoặc cát có FC thấp, trong khi hiệu quả suy giảm nhanh khi FC vượt quá một ngưỡng nhất định [20]. Trong các nền đất chứa nhiều hạt mịn, khả năng thoát nước hạn chế trong quá trình đầm rung cản trở sự tái cấu trúc của khung hạt, dẫn đến mức độ cải thiện cơ học không đáng kể [16]. Trong những trường hợp này, các giải pháp thiết kế thường cần tăng mật độ cột [13] hoặc kết hợp với các biện pháp hỗ trợ thoát nước, chẳng hạn như bấc thấm, nhằm nâng cao hiệu quả tổng thể của hệ thống gia cố [16].

3.3. Cơ chế gia cường và tái phân bố ứng suất

Bảng 3 cho thấy do GC có mô đun biến dạng và độ cứng chống cắt lớn hơn nhiều so với đất nền xung quanh, chúng hoạt động như các thành phần chịu lực ưu tiên trong GCSS [24]. Dưới tác động của tải trọng động, ứng suất sẽ tập trung vào các GC cứng hơn [11]. Sự

tập trung này tạo ra hiệu ứng "che chắn", làm giảm đáng kể mức độ ứng suất cắt mà phần đất cát nhạy cảm giữa các cột phải chịu, trực tiếp làm chậm quá trình phát sinh EPWP và giảm tiềm năng hóa lỏng [13].

Hiệu ứng gia cường được phát huy tối đa trong các hệ thống tiên tiến như EGC. Lớp vải địa kỹ thuật cung cấp lực cản hông, giúp duy trì tính toàn vẹn của cột, ngăn chặn hiện tượng phình và duy trì độ cứng cao của cột ngay cả trong các điều kiện đất yếu hoặc tải trọng động cực lớn. Sự kết hợp này không chỉ nâng cao sức chịu tải mà còn giảm thiểu đáng kể các biến dạng ngang và lún sau hóa lỏng [25], [26].

Bảng 3. Bảng tổng hợp nghiên cứu về cơ chế gia cường và tái phân bố ứng suất của GCSS

Công trình nghiên cứu	Loại thí nghiệm	Kết luận chính về cơ chế gia cường
Mitchell and Huber 1985 [11]	Case study	GC giúp giảm độ lún xuống còn 30-40% so với nền chưa xử lý nhờ tỷ số tập trung ứng suất đạt từ 2 đến 3.
Baez and Martin 1992 [12]	Mô hình toán học	Đưa ra mô hình tính toán giảm CSR dựa trên giả định biến dạng cắt tương thích giữa cột và đất (tập trung ứng suất cắt vào cột cứng).
Adalier et al. 2003 [15]	Thí nghiệm ly tâm	Trong đất bùn khó đầm chặt, cơ chế gia cường là yếu tố chính giúp giảm 50% độ lún dưới móng nông.
Martin et al. 2004 [27]	Case study	GC làm tăng đáng kể độ cứng cắt của nền, giảm biên độ biến dạng cắt chu kỳ xuống 100 lần, ngăn chặn phát sinh PWP.
Madhav and Krishna 2008 [24]	Tổng hợp lý thuyết	GC có mô đun biến dạng cao cung cấp sự gia cường cơ học, giúp nền đất chịu đựng lực động đất hiệu quả hơn.
Tang et al. 2015 [25]	Phân tích số	Lớp bọc địa kỹ thuật tăng đáng kể độ cứng của hệ thống móng, giảm biến dạng ngang nhiều hơn so với cột sỏi thông thường.
Hong et al. 2016 [28]	Thí nghiệm mô hình	Độ cứng của vải địa kỹ thuật chi phối khả năng chịu tải. Vải càng cứng thì ứng suất được truyền xuống sâu hơn và cột biến dạng đồng đều hơn.
Mohapatra and Rajagopal 2017 [29]	Phân tích ổn định mái dốc	EGC cung cấp hệ số an toàn cao hơn GC do khả năng kháng lại sự dịch chuyển ngang của đất.
Miranda et al. 2017 [26]	Thí nghiệm trong phòng	EGC hỗ trợ ứng suất thẳng đứng gấp 1.7 lần GC. Hệ số tập trung ứng suất của EGC đạt 11-25.
Badanagki et al. 2018 [30]	Thí nghiệm ly tâm	Cơ chế gia cường từ GC làm thay đổi tần số dao động tự nhiên của bãi đất, có thể khuếch đại gia tốc bề mặt nhưng lại giảm biến dạng ngang.
Cengiz et al. 2019 [31]	Thí nghiệm cắt đơn	EGC tăng 14-90% sức kháng cắt tĩnh và kháng cắt chu kỳ tùy theo độ cứng của vật liệu bọc.
Tiznado et al. 2020 [32]	Thí nghiệm ly tâm	Gia cường kết hợp đầm chặt là các cơ chế chính hạn chế biến dạng của đập/đê trên nền đất hóa lỏng so với cơ chế thoát nước.
Zhang et al. 2020 [33]	Thí nghiệm mô hình	Ứng suất trên cột tăng theo chiều dài bọc vải. EGC giảm lún tích lũy tốt hơn.

4. ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Mặc dù GC đã được áp dụng rộng rãi trong xử lý nền chống hóa lỏng, vẫn tồn tại khoảng cách đáng kể giữa lý thuyết hàn lâm và hướng dẫn thực hành thiết kế theo tiêu chuẩn. Các hướng dẫn thiết kế hiện nay còn phân mảnh, chưa nhất quán giữa các cơ chế làm việc. Đồng thời, các mô hình mô phỏng số vẫn thiếu kiểm chứng với dữ liệu thí nghiệm vật lý và hiện trường [5], [6]. Ở cấp độ thí nghiệm trong phòng, sự thiếu hụt các thí nghiệm phần tử, đặc biệt là thí nghiệm cắt đơn theo chu kỳ, đang cản trở việc hiệu chỉnh mô hình và đánh giá chính xác ứng xử động của GCSS. Do đó, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào nghiên cứu thí nghiệm phần tử - mô hình vật lý - hiện trường để xây dựng bộ cơ sở thiết kế thống nhất, góp phần đưa GCSS từ giải pháp dựa trên kinh nghiệm sang công nghệ xử lý nền có cơ sở khoa học và quy phạm rõ ràng hơn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng hợp và phân tích có hệ thống các nghiên cứu liên quan đến hiệu quả kháng hóa lỏng của GCSS dưới tác động của tải trọng chu kỳ. Thông qua việc tổng quan các kết quả thí nghiệm trong phòng, mô hình vật lý, mô phỏng số và quan trắc hiện trường, nghiên cứu cho thấy cơ chế làm việc của GC không thể được quy giản về một yếu tố đơn lẻ, mà là sự tương tác phức tạp giữa gia tăng độ cứng - phân bố lại ứng suất, khả năng tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng, và sự cải thiện điều kiện biến dạng của nền đất xung quanh.

Phân tích tổng hợp chỉ ra rằng hiệu quả kháng hóa lỏng của GC phụ thuộc mạnh vào đặc trưng đất nền (độ chặt, thành phần hạt mịn, tính co giãn thể tích), cấu hình hình học của hệ thống (tỷ lệ thay thế, đường kính và khoảng cách cột), cũng như đặc tính của tải trọng chu kỳ. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có vẫn chưa đạt được sự thống nhất trong việc định lượng vai trò tương đối của từng cơ chế.

Một điểm hạn chế nổi bật được nhận diện là sự thiếu hụt các nghiên cứu thí nghiệm phần tử, nhất là các thí nghiệm cắt đơn chu kỳ, nhằm làm rõ ứng xử cơ học của đất nền được gia cường trong điều kiện biến dạng cắt khống chế. Đồng thời, các mô hình số hiện nay, dù ngày càng tinh vi, vẫn phụ thuộc đáng kể vào giả thiết và tham số hiệu chỉnh chưa được kiểm chứng đầy đủ bằng dữ liệu thực nghiệm.

Từ các phân tích trên, bài báo nhấn mạnh nhu cầu phát triển một chương trình nghiên cứu tích hợp, kết nối chặt chẽ giữa thí nghiệm phần tử, mô hình vật lý và quan trắc hiện trường, nhằm làm rõ cơ chế làm việc chi phối của GC dưới tải trọng chu kỳ. Cách tiếp cận này không chỉ giúp thu hẹp khoảng cách giữa nghiên cứu hàn lâm và thực hành thiết kế, mà còn là cơ sở để xây dựng các hướng

dẫn thiết kế nhất quán và có cơ sở khoa học vững chắc hơn cho GCSS trong xử lý nền chống hóa lỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. W. Boulanger, I. M. Idriss, D. P. Stewart, Y. Hashash, and B. Schmidt, "Drainage capacity of stone columns or gravel drains for mitigating liquefaction," Geotech. Spec. Publ., no. 75 I, pp. 678-690, 1998.

[2] M. Abdelhamid, N. Ali, and T. Abdelaziz, "A Literature Review of Factors Affecting the Behavior of Encased Stone Columns," Geotech. Geol. Eng., vol. 41, no. 6, pp. 3253-3288, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10706-023-02492-8.

[3] H. B. Seed and J. R. Booker, "Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains," J. Geotech. Eng. Div., vol. 103, no. 7, pp. 757–768, Jul. 1977, doi: 10.1061/AJGEB6.0000453.

[4] S. Pal and K. Deb, "Effect of Stiffness of Stone Column on Drainage Capacity during Soil Liquefaction," Int. J. Geomech., vol. 18, no. 3, p. 04018003, Mar. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001108.

[5] K. Adalier and A. Elgamal, "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns," Eng. Geol., vol. 72, no. 3-4, pp. 275-291, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.enggeo.2003.11.001.

[6] R. Howell, E. M. Rathje, R. Kamai, and R. Boulanger, "Centrifuge Modeling of Prefabricated Vertical Drains for Liquefaction Remediation," J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 138, no. 3, pp. 262–271, Mar. 2012, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000604.

[7] S. Pal and K. Deb, "Effect of clogging of stone column on drainage capacity during soil liquefaction," Soils Found., vol. 59, no. 1, pp. 196-207, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.sandf.2018.10.005.

[8] A. J. Brennan and S. P. G. Madabhushi, "Effectiveness of vertical drains in mitigation of liquefaction," Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 22, no. 9-12, pp. 1059-1065, 2002, doi: 10.1016/S0267-7261(02)00131-8.

[9] Y.-G. Zhou, K. Liu, Z.-B. Sun, and Y.-M. Chen, "Liquefaction mitigation mechanisms of stone column-improved ground by dynamic centrifuge model tests," Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 150, p. 106946, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.soildyn.2021.106946.

[10] S. Iai, K. Koizumi, S. Noda, and H. Tsuchida, "Large Scale Model Tests and Analyses of Gravel Drains," Proceeding Ninth World Conf. Earthq. Eng., vol. 27, no. 3, p. III-261-266, 1988.

[11] J. K. Mitchell and T. R. Huber, "Performance of a stone column foundation," J. Geotech. Eng., vol. 111, no. 2, pp. 205-223, 1985, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:2(205).

[12] J. I. Baez and G. R. Martin, "Quantitative evaluation of stone column techniques for earthquake liquefaction," in Earthquake Engrg. 10th World Conf, 1992, pp. 1477-1483. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=KQEggXhSdJoC&oi=fnd&pg=PA1477&dq=Quantitative+evaluation+of+stone+column+techniques+for+earthquake+liquefaction&ots=hpk-w0kgeY&sig=p6GYzWzRVfUioGeoWZneLS4p4KU

[13] J. I. B. Satizabal, A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns. University of Southern California, 1995. Accessed: Jan. 29, 2026. [Online]. Available:
https://search.proquest.com/openview/fd6a160afcd0fff79a146f7999fecc4c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

[14] S. A. Ashford, K. M. Rollins, S. Case Bradford V, T. J. Weaver, and J. I. Baez, "Liquefaction Mitigation Using Stone Columns Around Deep Foundations: Full-Scale Test Results," Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, vol. 1736, no. 1, pp. 110–118, Jan. 2000, doi: 10.3141/1736-14.

[15] K. Adalier, A. Elgamal, J. Meneses, and J. I. Baez, "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils," Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 23, no. 7, pp. 571-584, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0267-7261(03)00070-8.

[16] T. Shenthan, R. Nashed, S. Thevanayagam, and G. R. Martin, "Liquefaction mitigation in silty soils using composite stone columns and dynamic compaction," Earthq. Eng. Eng. Vib., vol. 3, no. 1, pp. 39–50, Jun. 2004, doi: 10.1007/BF02668849.

[17] J. Hleibieh and I. Herle, "Numerical Analysis of Stone Columns for the Reduction of the Risk of Soil Liquefaction," Transp. Infrastruct. Geotechnol., vol. 7, no. 4, pp. 618–633, Dec. 2020, doi: 10.1007/s40515-020-00108-9.

[18] R. Farzalizadeh, A. Hasheminezhad, and H. Bahadori, "Shaking table tests on wall-type gravel and rubber drains as a liquefaction countermeasure in silty sand," Geotext. Geomembr., vol. 49, no. 6, pp. 1483–1494, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.geotexmem.2021.06.002.

[19] P. Tai, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, R. Chen, and Z. Li, "Cyclic behaviour of stone column reinforced subgrade under partially drained condition," Transp. Geotech., vol. 47, p. 101281, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.trgeo.2024.101281.

[20] B. C. Slocombe, A. L. Bell, and J. I. Baez, "The densification of granular soils using vibro methods," Geotechnique, vol. 50, no. 6, pp. 715–725, 2000, doi: 10.1680/geot.2000.50.6.715.

[21] C. Huang, Z. Sui, L. Wang, and K. Liu, "Mitigation of Soil Liquefaction Using Stone Columns: An Experimental Investigation," Mar. Georesources Geotechnol., vol. 34, no. 3, pp. 244–251, Apr. 2016, doi: 10.1080/1064119X.2014.1002872.

[22] K. Kirsch and F. Kirsch, Ground Improvement by Deep Vibratory Methods. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Taylor & Francis, 2017.

[23] Z. B. Salem, W. Frikha, and M. Bouassida, "Effects of densification and stiffening on liquefaction risk of reinforced soil by stone columns," J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 143, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001773.

[24] M. R. Madhav and A. M. Krishna, "Liquefaction Mitigation of Sand Deposits by Granular Piles- an Overview," in Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, H. Liu, A. Deng, and J. Chu, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 66-79. doi: 10.1007/978-3-540-79846-0_3.

[25] L. Tang, S. Cong, X. Ling, J. Lu, and A. Elgamal, "Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics," Geotext. Geomembr., vol. 43, no. 2, pp. 190-195, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.geotexmem.2014.11.011.

[26] M. Miranda, A. Da Costa, J. Castro, and C. Sagaseta, "Influence of geotextile encasement on the behaviour of stone columns: Laboratory study," Geotext. Geomembr., vol. 45, no. 1, pp. 14-22, 2017, doi: 10.1016/j.geotexmem.2016.08.004.

[27] J. R. Martin, C. Guney Olgun, J. K. Mitchell, and H. Turan Durgunoglu, "High-modulus columns for liquefaction mitigation," J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 130, no. 6, pp. 561–571, Jun. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(561).

[28] Y.-S. Hong, C.-S. Wu, and Y.-S. Yu, "Model tests on geotextile-encased granular columns under 1-g and undrained conditions," Geotext. Geomembr., vol. 44, no. 1, pp. 13-27, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.geotexmem.2015.06.006.

[29] S. R. Mohapatra and K. Rajagopal, "Undrained stability analysis of embankments supported on geosynthetic encased granular columns," Geosynth. Int., vol. 24, no. 5, pp. 465-479, Oct. 2017, doi: 10.1680/jgein.17.00015.

[30] M. Badanagki, S. Dashti, and P. Kirkwood, "A Centrifuge Study of the Influence of Dense Granular Columns on the Performance of Gently Sloping Liquefiable Sites," in Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2018, pp. 33-40. doi: 10.1061/9780784481455.003.

[31] C. Cengiz, I. E. Kilic, and E. Guler, "On the shear failure mode of granular column embedded unit cells subjected to static and cyclic shear loads," Geotext. Geomembr., vol. 47, no. 2, pp. 193-202, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.geotexmem.2018.12.011.

[32] J. C. Tiznado, J. C. Tiznado, S. Dashti, C. Ledezma, B. P. Wham, and M. Badanagki, "Performance of Embankments on Liquefiable Soils Improved with Dense Granular Columns: Observations from Case Histories and Centrifuge Experiments," J. Geotech. Geoenvironmental Eng., vol. 146, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002309.

[33] L. Zhang, Z. Xu, and S. Zhou, "Vertical cyclic loading response of geosynthetic-encased stone column in soft clay," Geotext. Geomembr., vol. 48, no. 6, pp. 897-911, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.geotexmem.2020.07.006.

■Ngày nhận bài: 11/3/2026 ■Ngày sửa bài: 18/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2026

Cơ chế và đặc trưng lực bám dính giữa cốt thép và bê tông nhẹ cốt liệu tái chế dưới ảnh hưởng của cường độ chịu nén

Bond mechanisms and characteristics between steel reinforcement and recycled lightweight aggregate concrete under the influence of compressive strength

> TS LÊ NGỌC LAN
Bộ môn XDDD&CN, Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
Email: lanln@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế (Recycled Lightweight Aggregate Concrete - RLWAC) hiện nay đang được quan tâm rộng rãi trong xây dựng nhờ khả năng giảm khối lượng bản thân của kết cấu và tận dụng phế thải xây dựng. Tuy nhiên, sự khác biệt về đặc tính vật liệu, đặc biệt là vùng chuyển tiếp (Interfacial Transition Zone - ITZ), làm thay đổi đáng kể cơ chế liên kết giữa cốt thép và bê tông. Bài báo này tổng hợp và phân tích dữ liệu thực nghiệm từ nhiều nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cường độ chịu nén bê tông đến lực bám dính cực đại giữa cốt thép và bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế. Kết quả cho thấy lực bám dính cực đại tăng theo cường độ chịu nén; tuy nhiên, mối quan hệ này không hoàn toàn tuyến tính. Đối với bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế, tốc độ tăng của lực bám dính thường thấp hơn so với bê tông nhẹ thông thường do ảnh hưởng của cấu trúc rỗng và vùng ITZ yếu. Ngoài ra, hiện tượng "bão hòa lực bám dính" có thể xuất hiện khi cường độ bê tông đạt mức trung bình đến cao. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá và thiết kế liên kết bê tông - cốt thép trong các kết cấu bê tông nhẹ sử dụng vật liệu tái chế.

Từ khóa: Bê tông nhẹ; cốt liệu tái chế, lực dính - độ trượt; cường độ chịu nén.

ABSTRACT

Recycled Lightweight Aggregate Concrete (RLWAC) has recently attracted considerable attention in construction due to its ability to reduce the self-weight of structures and promote the reuse of construction waste. However, differences in material properties, particularly within the Interfacial Transition Zone (ITZ), significantly affect the bond mechanism between steel reinforcement and concrete. This paper compiles and analyzes experimental data from various studies to evaluate the influence of concrete compressive strength on the maximum bond strength between steel reinforcement and RLWAC. The results indicate that the maximum bond strength increases with compressive strength; however, this relationship is not strictly linear. For RLWAC, the rate of increase in bond strength is generally lower than that of conventional lightweight concrete, primarily due to its porous structure and weaker ITZ.

In addition, a "bond strength saturation" phenomenon may occur as compressive strength increases to moderate-to-high levels. The findings of this study provide a scientific basis for evaluating and designing the bond behavior between steel reinforcement and concrete in structural elements made with recycled lightweight aggregate concrete.

Keywords: Lightweight concrete; recycled aggregates; bond-slip; compressive strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông nhẹ (Lightweight Concrete - LWC) là loại bê tông có khối lượng thể tích thấp hơn bê tông thường nhờ sử dụng cốt liệu nhẹ hoặc tạo lỗ rỗng trong cấu trúc vật liệu. Theo tiêu chuẩn BS EN 206-1 [1], bê tông nhẹ có khối lượng thể tích nhỏ hơn 2000 kg/m^3 và cường độ chịu nén có thể dao động từ 8 đến 80 MPa. Theo TCVN 9029:2017 [2], bê tông nhẹ là bê tông có khối lượng thể tích khô nhỏ hơn 1800 kg/m^3, bao gồm bê tông cốt liệu nhẹ, các loại bê tông tổ ong như bê tông bọt, bê tông khí chưng áp AAC. Có thể thấy rằng khi khối lượng thể tích giảm từ 2400 kg/m^3 trong bê tông truyền thống xuống còn 1800-2000 kg/m^3 đối với LWC thì có thể giảm đáng kể tải trọng bản thân của kết cấu, từ đó tiết kiệm vật liệu và nâng cao hiệu quả kinh tế. Ngoài ra, bê tông nhẹ còn có ưu điểm về khả năng cách nhiệt, cách âm và chống cháy.

Bên cạnh đó, hiện nay, xu hướng tái sử dụng phế thải xây dựng đã thúc đẩy sự phát triển của bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế.

Loại vật liệu này không chỉ góp phần giảm ô nhiễm môi trường mà còn tạo ra nguồn cốt liệu thay thế cho các tài nguyên tự nhiên ngày càng khan hiếm. Tuy nhiên, cốt liệu tái chế thường có cấu trúc dị thể với lớp vữa xi măng cũ bám dính trên bề mặt, dẫn đến độ rỗng và độ hút nước cao [3]. Điều này làm thay đổi cấu trúc vi mô của bê tông, đặc biệt là vùng chuyển tiếp ITZ giữa cốt liệu và hồ xi măng.

Một trong những vấn đề quan trọng trong kết cấu bê tông cốt thép là lực bám dính giữa cốt thép và bê tông, cơ chế đảm bảo sự làm việc đồng thời của hai vật liệu. Sự suy giảm liên kết có thể dẫn đến trượt cốt thép, mở rộng vết nứt và làm giảm khả năng chịu lực của cấu kiện.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về liên kết bê tông - cốt thép trong bê tông thường và bê tông nhẹ, các nghiên cứu về ảnh hưởng của cường độ chịu nén đến lực bám dính trong bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế vẫn còn hạn chế. Do đó, trong bài báo này tác giả đề cập đến nội dung nghiên cứu về "Cơ chế và đặc trưng lực bám dính giữa cốt thép và bê tông nhẹ cốt liệu tái chế dưới ảnh hưởng của cường độ chịu nén", với mục tiêu nghiên cứu: Phân tích quan hệ giữa cường độ chịu nén và lực bám dính cực đại; So sánh xu hướng phát triển lực bám dính giữa bê tông nhẹ tái chế và bê tông nhẹ thông thường; Làm rõ hiện tượng bão hoà lực bám dính trong bê tông nhẹ.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ LỰC BÁM DÍNH

2.1. Cơ chế bám dính giữa cốt thép và bê tông

Theo nghiên cứu, liên kết giữa bê tông và cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép được duy trì thông qua ba cơ chế truyền lực cơ bản [4]: dính kết hóa học, ma sát và khóa cơ học. Các cơ chế này không chỉ hoạt động riêng lẻ mà còn có sự phối hợp lẫn nhau tuỳ theo giai đoạn tải trọng, tính chất của bê tông và loại cốt thép sử dụng.

Dính kết hóa học là cơ chế liên kết xuất hiện đầu tiên giữa bê tông và cốt thép, hình thành nhờ sự tương tác hóa học giữa bề mặt cốt thép và hồ xi măng trong quá trình bê tông đóng rắn. Đây là cơ chế chính cho đoạn tuyến tính đầu tiên trong quan hệ lực dính - độ trượt, khi lực liên kết còn thấp và độ trượt nhỏ [4], [5]. Tuy nhiên, khả năng chịu lực của dính kết hóa học rất hạn chế và dễ dàng bị phá vỡ ngay khi xuất hiện sự trượt nhỏ giữa bê tông và cốt thép [4]. Ngoài ra, vai trò bám dính vật lý khi bê tông cứng lại quanh cốt thép có dân, phần gân tạo ra lực cản cơ học giúp cốt thép không bị trượt khi chịu lực kéo. Kaffetzakis [5] bổ sung rằng sự tương tác hóa học giữa bề mặt thép và các thành phần trong hồ xi măng cũng góp phần nâng cao hiệu quả liên kết ở giai đoạn đầu. Các gờ nổi trên bề mặt cốt thép không chỉ tạo ma sát mà còn làm tăng diện tích bám dính hiệu quả. Thêm vào đó, theo J. Alexandre Bogas và cộng sự (2014) [3], trong LWC, hiệu quả dính kết hóa học thường được cải thiện hơn so với bê tông thông thường (Normal Weight Concrete - NWC), nhờ tỉ lệ nước/xi măng thấp và hiện tượng bảo dưỡng nội bộ từ cốt liệu nhẹ (LWA). Ngoài ra, sự tương thích tốt về biến dạng giữa LWA và hồ xi măng giúp giảm thiểu vi nứt trong vùng liên kết, từ đó tăng cường độ bền lâu dài của liên kết bê tông - cốt thép.

Sau khi liên kết hóa học bị phá vỡ, hai cơ chế ma sát và khóa cơ học đảm nhận vai trò chính trong việc truyền lực giữa bê tông và cốt thép [4]. Ma sát phát sinh từ lực ép tiếp xúc giữa bề mặt cốt thép và bê tông, cản trở sự trượt tương đối. Trong khi đó, khóa cơ học hình thành nhờ sự tương tác hình học giữa các gờ nổi của thanh cốt thép và nền bê tông, tạo ra các lực xiên dọc theo thanh thép ngay cả khi đã xảy ra trượt. Các lực này gây ra ứng suất liên kết dọc và ứng suất tách xuyên tâm. Ứng suất liên kết chống lại sự trượt giữa thép và bê tông, trong khi ứng suất tách có thể gây ra nứt tách dọc khi vượt quá giới hạn cường độ bê tông [4]. Ngoài ra, ứng suất cục bộ tại các gờ thép cũng có thể sinh ra vi nứt ngang, làm suy yếu liên kết [4]. Sự tồn tại của ứng suất pháp tuyến là điều kiện cần thiết để duy trì truyền lực liên kết. Trong bê tông nhẹ, các nghiên cứu [3], [6] chỉ ra rằng hiệu quả ma sát và khóa cơ học thấp hơn do cốt liệu nhẹ có độ cứng và cường độ nén thấp, vùng ITZ yếu và dễ hình thành vi nứt. Khi liên kết mất đi, lực dính suy giảm nhanh sau điểm cực đại trong biểu đồ lực dính - độ trượt, phản ánh tính giòn cao của vật liệu. Theo nghiên cứu [7], trong giai đoạn truyền lực chính, lực chủ yếu được truyền qua ma sát cơ học giữa gờ thép và bê tông xung quanh, tạo ra các ứng suất nén cục bộ tại vùng tiếp xúc. Nếu nền bê tông yếu như trong LWAC, các vi nứt cục bộ dễ phát triển, làm suy giảm nhanh hiệu quả liên kết. Các nghiên cứu gần đây [7], [8] cũng đồng thuận rằng trong LWAC, do độ đặc chắc và mô đun đàn hồi của nền bê tông thấp, hiệu ứng khóa cơ học và ma sát đều suy yếu rõ rệt. Đặc biệt, vùng chuyển tiếp ITZ trong bê tông nhẹ - vốn kém đặc chắc hơn do độ hút nước cao của cốt liệu nhẹ - là nguyên nhân chính dẫn tới sự suy giảm lực liên kết.

Tóm lại, mặc dù ba cơ chế truyền lực cơ bản vẫn tồn tại trong bê tông nhẹ, nhưng hiệu quả tổng thể của chúng thấp hơn đáng kể so với bê tông thường. Điều này lý giải vì sao biểu đồ quan hệ lực dính - độ trượt của LWAC có giai đoạn suy giảm nhanh và lực dính dự thấp hơn, phản ánh sự mất ổn định liên kết sau điểm cực đại.

2.2. Quan hệ lực bám dính - độ trượt

Quan hệ lực dính - độ trượt giữa cốt thép và bê tông nhẹ thường được xác định thông qua thí nghiệm kéo tuột thanh cốt thép. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy đường cong τ–s điển hình gồm 3 đến 4 giai đoạn: tăng tuyến tính ban đầu, tăng phi tuyến đến cực đại, suy giảm sau khi đạt cực đại, và giai đoạn lực dự.

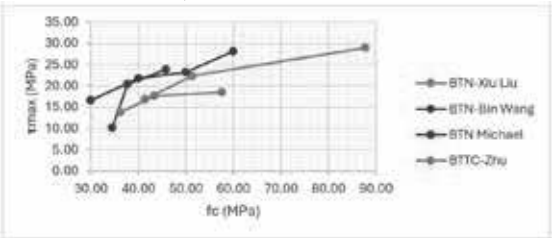
Trong bê tông nhẹ tự lèn cốt liệu thô, Kaffetzakis và Papanicolaou [5] ghi nhận giai đoạn đầu gần tuyến tính, phản ánh ứng xử đàn hồi với độ trượt nhỏ, lực dính thấp do hồ vữa bị nghiền nát tại gờ cốt thép. Tiếp theo, lực dính tăng phi tuyến do hiệu ứng chêm tại gờ thép. Đạt cực đại khi suy giảm do phát hoại dạng nứt tách, và sau cùng duy trì lực dính dư nhờ ma sát và khóa cơ học yếu. Tương tự, Ayman Trad et al [9] khi nghiên cứu bê tông nhẹ kết cấu đã xác định ba giai đoạn điển hình trong đường cong lực dính - độ trượt: đoạn tuyến tính ngắn phản ánh ứng sử đàn hồi ban đầu, đoạn phi tuyến tăng đến cực đại khi cơ chế liên kết chuyển từ dính kết hoá học sang ma sát và khoá cơ học, và đoạn suy giảm lực dính sau phá hoại vùng tiếp xúc. Kết quả thực nghiệm cho thấy sự gia tăng chiều dài neo làm giảm lực dính cực đại do phân bố ứng suất không đều dọc theo chiều dài liên kết. Ngoài ra, so sánh với bê tông thường (NWC) cho thấy LWC có dạng đường cong tương tự, nhưng thường xuất hiện độ trượt không đều ở hai đầu mẫu, phản ánh mức độ trượt không đồng nhất cao hơn của vật liệu. Đối với bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu nhựa tái chế phủ cát, Heru Purnomo et al. [8] ghi nhận giai đoạn vi trượt ban đầu, tiếp theo là gia tăng phi tuyến tới cực đại khi lớp hồ xi măng mất bám dính, và giai đoạn suy giảm nhanh về lực dính dư. Trong nghiên cứu trên bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ, Xue Yang et al. [6] mô tả đường cong τ–s theo tiêu chuẩn CEB - FIP với bốn giai đoạn rõ rệt. So với NWC, LWA có độ dốc nhỏ hơn, lực dính cực đại thấp hơn, quá trình suy giảm sau cực đại nhanh hơn và lực dính dư thấp hơn, phản ánh tính giòn và vùng chuyển tiếp (ITZ) yếu hơn của vật liệu.

Nhìn chung, bê tông nhẹ có dạng đường cong τ–s tương tự như NWC, nhưng được đặc trưng bởi độ cứng ban đầu thấp hơn, suy giảm lực dính nhanh hơn sau cực đại và lực dư thấp hơn. Các đặc tính này chủ yếu bắt nguồn từ mô đun đàn hồi thấp, cấp trúc rỗng xốp, và chất lượng ITZ kém. Từ các nghiên cứu, có thể tổng hợp các giai đoạn điển hình của đường cong lực dính - độ trượt như sau: giai đoạn đầu (tuyến tính): ứng xử đàn hồi, lực dính thấp, độ trượt nhỏ; giai đoạn suy giảm: lực dính giảm nhanh do mất liên kết; giai đoạn dư lực: duy trì ma sát yếu hoặc khóa cơ học còn lại.

2.3. Quan hệ giữa lực bám dính và cường độ chịu nén

Trong tính toán liên kết giữa cốt thép và bê tông LWAC, việc xác định chính xác lực dính cực đại (τ_{max}) là yếu tố then chốt nhằm đảm bảo xác định chính xác khả năng truyền lực tại vùng tiếp xúc. So với bê tông NWC, LWAC có cấu trúc vật liệu không đồng nhất, cốt liệu xốp, vùng chuyển tiếp ITZ yếu và đặc tính cơ học chịu ảnh hưởng lớn bởi loại cốt liệu, điều kiện bảo dưỡng và hàm lượng phụ gia. Do đó, các công thức cổ điển xây dựng cho NWC không còn phù hợp, và cần được hiệu chỉnh bằng các mô hình thực nghiệm đặc thù. Theo tổng hợp từ nhiều nghiên cứu, lực dính cực đại của LWAC thường được mô tả theo dạng hàm mũ: $\tau_{max} = k(f_c')^n$. Trong đó: τ_{max}: lực dính cực đại giữa cốt thép và bê tông (MPa); f_c': cường độ chịu nén mẫu trụ của bê tông nhẹ (MPa); hệ số k và n thường được hiệu chỉnh thông qua phân tích hồi quy dựa trên dữ liệu thí nghiệm.

Tuỳ thuộc vào loại bê tông, cốt liệu và điều kiện thí nghiệm, hệ số n dao động trong một khoảng rộng. Mo et al. (2016) [10] đề xuất sử dụng n = 0,5, phù hợp với các loại LWAC thông thường có cấu trúc ổn định. Ngược lại, J. Alexandre Bogas [3] chỉ ra rằng với LWAC sử dụng cốt liệu đất sét nở có cường độ cao, khi f_c' vượt 60 MPa, xuất hiện hiện tượng "bão hòa lực dính" làm giảm hệ số n xuống khoảng 0,25-0,28 do hạn chế truyền ứng suất tại ITZ.



Hình 1. Biểu đồ quan hệ cường độ chịu nén và lực dính cực đại

Biểu đồ Hình 1 cho thấy lực dính cực đại τ_{max} có xu hướng tăng theo cường độ chịu nén của bê tông f_c. Quan hệ này thể hiện khá rõ trong tất cả các nhóm nghiên cứu. Cường độ nền bê tông đóng vai trò quan trọng trong khả năng truyền tải lực dính giữa cốt thép và bê tông. Khi cường độ chịu nén tăng, khả năng chống ép nát của bê tông tại vùng tiếp xúc quanh gờ cốt thép được cải thiện, làm tăng hiệu quả của cơ chế khóa cơ học và từ đó nâng cao giá trị lực dính cực đại. Trong các nghiên cứu của Liu [11] và Bin Wang [12], khi fc tăng từ khoảng 30 - 60 MPa, giá trị τ_{max} tăng đáng kể từ khoảng 16 - 17 MPa lên gần 28 - 29 MPa, cho thấy mối tương quan khá mạnh giữa hai đại lượng này. Tuy nhiên, mức độ gia tăng của giá trị lực dính cực đại không hoàn toàn tỷ lệ thuận với tốc độ tăng cường độ chịu nén. Ở vùng cường độ cao, đường xu hướng của τ_{max} có dấu hiệu tăng chậm. Trong nghiên cứu của Liu [11], khi f_c tăng mạnh từ khoảng 50 MPa lên gần 90 MPa, thì τ_{max} chỉ tăng thêm khoảng 6 - 7 MPa. Điều này cho thấy sau một giới hạn nhất định, sự cải thiện lực dính không còn phụ thuộc hoàn toàn vào cường độ nén mà còn chịu ảnh hưởng của các yếu tố khác như chất lượng vùng chuyển tiếp ITZ, ứng suất tách ngang, độ nhám bề mặt cốt thép và đặc tính nứt của bê tông. Đối với nhóm bê tông cốt liệu tái chế của Zhu [13], mặc dù cường độ chịu nén tăng nhưng tốc độ tăng của τ_{max} thấp hơn so với bê tông nhẹ thông thường. Nguyên nhân là do cốt liệu tái chế tạo ra cấu trúc rỗng và nhiều vi khe nứt hơn trong vùng ITZ, làm suy giảm hiệu quả truyền ứng suất dính.

Nhìn chung, lực dính cực đại τ_{max}của LWAC có quan hệ đồng biến với cường độ chịu nén f_c, tuy nhiên, mức độ gia tăng không hoàn toàn tuyến tính. Ở vùng cường độ cao, hiện tượng "bão hòa lực dính" xuất hiện do giới hạn truyền ứng suất tại vùng ITZ và do ảnh hưởng của cấu trúc rỗng trong bê tông nhẹ. Vì vậy, việc xây dựng các mô hình thực nghiệm đặc thù cho LWAC là cần thiết nhằm dự đoán chính xác khả năng liên kết giữa cốt thép và bê tông.

3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM BÊ TÔNG NHẸ SỬ DỤNG HẠT CỐT LIỆU NHẸ TÁI CHẾ

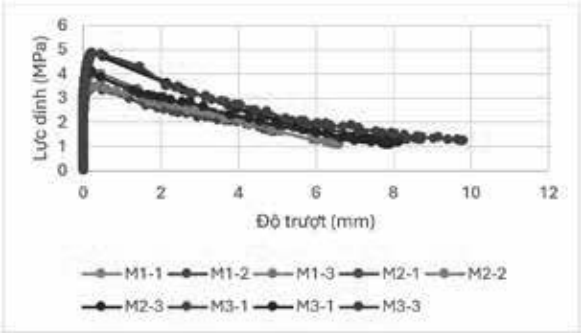
Nghiên cứu sử dụng vật liệu và cấp phối bê tông hạt cốt liệu nhẹ tái chế được sản xuất từ phế thải phá dỡ công trình theo quy trình của Mueller et al. [14] Cấp phối lực chọn để tạo ra cường độ chịu nén (mẫu trụ) của bê tông khoảng 15 MPa, 25 MPa và 35 MPa tại 28 ngày tuổi lần lượt ký hiệu là M1, M2, M3. Thành phần cấp phối của bê tông được thể hiện trong Bảng 1, trong đó N/CKD, V_{CLN}/V_b , V_c/V_{CL} lần lượt là tỷ lệ nước/chất kết dính, tỷ lệ thể tích cốt liệu nhẹ/thể tích bê tông, tỷ lệ thể tích cát/cốt liệu.

Bảng 1. Cấp phối hỗn hợp bê tông nhẹ

STT	Tên cấp phối	N/CKD	V_{CLN}/V_b	V_c/V_{CL}	Tro bay (%)	Phụ gia siêu dẻo (%)
1	M3	0.36	0.35	0.45	27.61%	1%
2	M2	0.36	0.31	0.45	27.61%	1%
3	M1	0.36	0.28	0.45	27.61%	1%

Kết quả thí nghiệm về quan hệ lực bám dính - độ trượt giữa cốt thép và RLWAC được xác định thông qua thí nghiệm kéo tuột cốt thép trên các mẫu thuộc ba nhóm cường độ M1, M2, M3 theo hướng dẫn của RILEM và SNIP 2.03.01-84 [15]. Đối với mỗi nhóm cấp phối M1, M2 và M3, chế tạo 3 mẫu lập phương có kích thước 150 × 150 × 150 mm. Sử dụng thanh cốt thép có đường kính d = 12 mm đặt tại tâm mẫu và song song với các cạnh của mẫu bê tông. Chiều dài bám dính giữa cốt thép và bê tông được lấy bằng 5d (60 mm), đảm bảo yêu cầu kéo đúng tâm và tránh ảnh hưởng của sự phá hoại do tách bê tông. Gia tải ngoại lực kéo tác dụng lên thanh cốt thép tăng dần cho đến khi xảy ra hiện tượng tuột thép khỏi bê tông. Chuyển vị trượt của thanh thép so với bê tông được đo trực tiếp trong quá trình gia tải. Kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong nghiên cứu trước của nhóm tác giả [16].

Hình 2. Mẫu thí nghiệm sau khi kéo tuột thép khỏi liên kết với bê tông



Hình 3. Biểu đồ lực dính - độ trượt của BTNCLNTC của mẫu M1; M2 và M3

Kết quả nghiên cứu cho thấy đường cong τ-s điển hình gồm 4 giai đoạn: tuyến tính ban đầu, phát triển phi tuyến, đạt cực đại và suy giảm nhanh. Giá trị lực dính cực đại τ_{max} dao động từ 3,4 đến 4,9 MPa và độ trượt tại đỉnh tương ứng s1 ≈ 0,2 mm. Độ dốc lớn trong giai đoạn suy giảm phản ánh tính giòn đặc trưng của vật liệu. Cơ chế truyền lực trong RLWAC diễn ra thông qua ba cơ chế chính: dính kết hóa học, ma sát và khóa cơ học. Tuy nhiên, sự đóng góp của từng cơ chế có sự khác biệt đáng kể so với bê tông truyền thống và bê tông thông thường. Ở giai đoạn đầu, liên kết hóa học trong RLWAC nhanh chóng bị phá vỡ do đặc

tính rỗng, xốp và độ hút nước cao của cốt liệu tái chế làm suy yếu lớp hồ xi măng bao quanh cốt thép. Khóa cơ học vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc truyền lực, nhưng hiệu quả giảm rõ rệt do nền bê tông yếu hơn và khả năng chịu nén cục bộ kém hơn. Lực ma sát giữa cốt thép và bê tông, đặc biệt ở giai đoạn sau đỉnh của đường cong lực dính - độ trượt, duy trì ở mức thấp, khiến phá hoại liên kết xảy ra sớm theo dạng kéo tuột giòn (pull-out failure). Dạng phá hoại kéo tuột giòn được đặc trưng bởi hiện tượng thanh cốt thép bị trượt khỏi bê tông khi lực dính không đủ lớn để duy trì truyền lực, mà không xuất hiện biến dạng dẻo rõ rệt của cốt thép, cũng như không có nứt tách đáng kể trong khối bê tông như Hình 3. Biểu hiện của tính giòn này được thể hiện rõ rệt ở biểu đồ đường cong lực dính - độ trượt: sau khi đạt đỉnh, lực dính suy giảm nhanh chóng ngay sau đó.

Đồng thời, dựa trên kết quả thí nghiệm kéo tuột thanh cốt thép ra khỏi khối bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu nhẹ tái chế, nhóm tác giả đã tiến hành phân tích hồi quy để xây dựng công thức thực nghiệm nhằm xác định giá trị lực dính cực đại τ_{max}. Kết quả cho thấy lực dính cực đại có mối tương quan tỉ lệ thuận với cường độ nén của bê tông. Mô hình hồi quy phi tuyến được xây dựng dựa trên dữ liệu thí nghiệm có dạng: $\tau_{max} = 0{,}88(\mathrm{f}_c')^{0{,}5}$. Trong đó: τ_{max}: lực dính cực đại giữa cốt thép và bê tông (MPa); f_c': cường độ chịu nén mẫu trụ của bê tông nhẹ (MPa);

Mô hình này có dạng gần tương đồng với các nghiên cứu trước đây về bê tông nhẹ thông thường. Mo et al. (2016) [10] đã đề xuất tương đương với dạng mô hình truyền thống vốn được áp dụng cho bê tông nặng (NWC). Giá trị n = 0.5 trong mô hình của nhóm tác giả cho thấy tính tương thích với lý thuyết cơ bản về liên kết bê tông - cốt thép, đồng thời cũng phù hợp với kết quả thực nghiệm đối với bê tông nhẹ có cường độ trung bình. Tuy nhiên, hệ số k = 0,88 so với các công trình nghiên cứu trước nằm ở mức trung bình - thấp và thể hiện những khác biệt đáng kể về bản chất vật liệu. Cụ thể, các nghiên cứu như Mo et al. (2016) [10] đề xuất hệ số k = 4,5 cho bê tông nhẹ tổng quát, trong khi CEB - fib Model Code [17] sử dụng giá trị k = 2,0, đều cao hơn đáng kể so với kết quả của nghiên cứu này. Điều này cho thấy các mô hình truyền thống có thể đang đánh giá cao khả năng liên kết của bê tông nhẹ, đồng thời cũng chưa có nhiều nghiên cứu về việc đánh giá khả năng liên kết của bê tông nhẹ sử dụng vật liệu tái chế, do chưa xét đến độ rỗng cao và vi cấu trúc yếu tại vùng tiếp xúc ITZ. Ngược lại, một số nghiên cứu như Chen et al. [18] và Tang et al. (2008) [19] ghi nhận hệ số k dao động trong khoảng 0,63 đến 1,31 với các giá trị n nhỏ hơn 0,5 tương ứng với vật liệu có cường độ thấp hoặc cấu trúc không đồng nhất như bê tông nhẹ có cốt liệu polystyrene hay gốm nung. So với các nghiên cứu này, hệ số k = 0,88 trong nghiên cứu này thể hiện tính liên kết ở mức khá, phù hợp với đặc điểm của bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế: tuy có độ rỗng cao và ITZ yếu, nhưng nhờ hiệu ứng dính kết của hồ xi măng hydrat hóa quanh hạt cốt liệu, liên kết vẫn được duy trì ở mức tương đối ổn định. Từ đó, có thể thấy hệ số k = 0,88 là kết quả đặc trưng của loại bê tông sử dụng cốt liệu tái chế, thể hiện cả ưu điểm và nhược điểm của vật liệu này. Đây là cơ sở quan trọng để hiệu chỉnh các mô hình lực dính hiện hành, giúp nâng cao độ chính xác khi áp dụng vào thiết kế cấu kiện bê tông nhẹ sử dụng hạt cốt liệu tái chế trong thực tiễn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng hợp và phân tích cơ chế bám dính giữa cốt thép và bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu tái chế dưới ảnh hưởng của cường độ chịu nén. Kết quả cho thấy liên kết bê tông - cốt thép trong RLWWAC vẫn được hình thành bởi 3 cơ chế chính gồm dính kết hoá học, ma sát và khoá cơ học; tuy nhiên, hiệu quả của các cơ chế này thấp hơn so với bê tông thường do cấu trúc rỗng, độ hút nước cao của cốt liệu nhẹ tái chế và vùng chuyển tiếp ITZ yếu.

Quan hệ lực dính - độ trượt của RLWAC có dạng tương tự bê tông thông thường nhưng thể hiện rõ tính giòn hơn, với giai đoạn suy giảm lực dính nhanh sau khi đạt giá trị cực đại. Cường độ chịu nén bê tông có ảnh hưởng rõ rệt đến lực dính cực đại; khi fc tăng thì τ_{max} cũng tăng. Tuy nhiên, mối quan hệ này không hoàn toàn tuyến tính và có xu hướng bão hòa ở vùng cường độ cao, do khả năng truyền ứng suất bị giới hạn bởi chất lượng ITZ, cấu trúc rỗng và sự phát triển vi nứt trong nền bê tông. Từ dữ liệu thực nghiệm, mô hình hồi quy $\tau_{max} = 0{,}88(\mathrm{f}_c')^{0{,}5}$ được đề xuất để dự đoán lực dính cực đại của RLWAC. Hệ số k = 0,88 thấp hơn nhiều so với các mô hình truyền thống cho bê tông thường và bê tông nhẹ thông thường, cho thấy cần hiệu chỉnh riêng các công thức thiết kế khi áp dụng cho RLWAC.

Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ đặc trưng liên kết giữa cốt thép và bê tông nhẹ cốt liệu tái chế, đồng thời cung cấp cơ sở thực nghiệm để đánh giá chiều dài neo, khả năng truyền lực và ứng xử nứt của cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng vật liệu tái chế. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần mở rộng dữ liệu thí nghiệm với nhiều loại cốt liệu tái chế, cấp cường độ, đường kính cốt thép và chiều dài neo khác nhau nhằm hoàn thiện mô hình tính toán có độ tin cậy cao hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] B. S. EN, '206-1 Concrete-Part 1: Specification, performance, production and conformity', Br. Stand. Inst., 2000.

[2] 'TCVN-9030-2017 Bê tông nhẹ - Phương pháp thử'.

[3] J. Alexandre Bogas, M. G. Gomes, and S. Real, 'Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition', Constr. Build. Mater., vol. 65, pp. 350-359, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.122.

[4] K. Lundgren, 'Three-Dimensional Modelling of Bond in Reinforced Concrete'.

[5] M. I. Kaffetzakis and C. G. Papanicolaou, 'Bond behavior of reinforcement in Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete', Constr. Build. Mater., vol. 113, pp. 641–652, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.081.

[6] J. Yang, Q. Du, and Y. Bao, 'Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks', Constr. Build. Mater., vol. 25, no. 4, pp. 1935-1945, 2011.

[7] M. A. Abed, Z. Alkurdi, J. Fořt, R. Černý, and S. Solyom, 'Bond Behavior of FRP Bars in Lightweight SCC under Direct Pull-Out Conditions: Experimental and Numerical Investigation', Materials, vol. 15, no. 10, p. 3555, May 2022, doi: 10.3390/ma15103555.

[8] H. Purnomo, M. Chalid, G. Pamudji, and T. W. Arrifian, 'Bond–Slip Relationship between Sand-Coated Polypropylene Coarse Aggregate Concrete and Plain Rebar', Materials, vol. 15, no. 7, p. 2643, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15072643.

[9] A. Trad, H. Ghanem, and R. Ismail, 'Bond Behaviour of Structural Lightweight Concrete', in High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, D. A. Hordijk and M. Luković, Eds, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 595-603. doi: 10.1007/978-3-319-59471-2_71.

[10] K. H. Mo, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, 'Bond properties of lightweight concrete – A review', Constr. Build. Mater., vol. 112, pp. 478-496, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.125.

[11] X. Liu, Y. Liu, T. Wu, and H. Wei, 'Bond-slip properties between lightweight aggregate concrete and rebar', Constr. Build. Mater., vol. 255, p. 119355, 2020.

[12] B. Wang, E. Zhu, Z. Zhang, and C. Zhu, 'Bond-slip behaviour of lightweight aggregate concrete based on virtual crack model with exponential softening characteristics', Constr. Build. Mater., vol. 345, p. 128349, 2022.

[13] Q. Zhu, J. Chen, Y. He, and X. Sun, 'Bond stress distribution and bond-slip model of deformed steel bars in iron tailing sand recycled aggregate concrete', Buildings, vol. 13, no. 5, p. 1176, 2023.

[14] A. Mueller, S. Sokolova, and V. Vereshagin, 'Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials', Constr. Build. Mater., vol. 22, no. 4, pp. 703-712, 2008.

[15] 'pdfcoffee.com-snip-20301-84concrete-and-reinforced-concrete-structures'.

[16] H. P. Nguyen, N. L. Le, T.-T. T. Nguyen, C. T. Nguyen, and V. T. Nguyen, 'Mechanical properties of structural lightweight concrete using lightweight aggregates from construction and demolition waste', GEOMATE J., vol. 25, no. 110, pp. 40-48, 2023.

[17] C. E.-I. du Béton, CEB-FIP model code 1990: Design code. Thomas Telford Publishing, 1993.

[18] Y. Chen, Y. Zhao, L. Zeng, W. Zhang, and T. Yang, 'Bond performance and bond-slip constitutive model for rebar embedded in rubber powder-modified polypropylene fiber reinforced concrete', Constr. Build. Mater., vol. 375, p. 130934, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130934.

[19] W. C. Tang, T. Y. Lo, and R. V. Balendran, 'Bond performance of polystyrene aggregate concrete (PAC) reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars', Build. Environ., vol. 43, no. 1, pp. 98-107, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.030.

■Ngày nhận bài: 28/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Xây dựng khung đánh giá tiên tiến cho vật liệu xanh tại cảng hàng không Việt Nam

Integrated design framework for optimizing Vietnam's passenger terminals: Balancing national and international standards

> **THS BÙI NAM PHƯƠNG, NGUYỄN DUY TÂN*, NGUYỄN NGỌC TÂM NHƯ**
Khoa Xây dựng, Học viện Hàng không Việt Nam
*Email: tann_d@vaa.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh ngành hàng không (HK) Việt Nam tăng trưởng nhanh chóng, cùng với cam kết Net Zero 2050, việc xây dựng một khung tiêu chí đánh giá về vật liệu xanh (VLX) chuyên biệt cho hạ tầng cảng hàng không, sân bay (CHK, SB) trở nên cấp thiết. Đầu tiên, nghiên cứu tổng hợp và phân tích các hệ thống chứng nhận quốc tế (LEED, BREEAM, Green Mark), tiêu chuẩn trong nước (LOTUS, tiêu chuẩn Việt Nam), quy chuẩn kỹ thuật quốc gia (QCVN) và các yêu cầu chuyên ngành về hàng không, từ đó một bộ tiêu chí ứng viên được thiết lập. Tiếp theo, khung đánh giá VLX tiên tiến (Advanced Green Material Assessment Framework - AGMAF) được cấu trúc theo ba trụ cột bền vững (kinh tế, môi trường, xã hội) với 10 nhóm tiêu chí, trong đó an toàn phòng cháy, chữa cháy (PCCC) được coi là điều kiện tiên quyết. Cuối cùng, trọng số các trụ cột được xác định bằng phương pháp phân tích thứ bậc AHP (Analytic Hierarchy Process), trên cơ sở khảo sát đa bên liên quan (cơ quan quản lý, chủ đầu tư, nhà thầu, tư vấn), cho thấy mức độ ưu tiên và mức đồng thuận rất cao về tính cần thiết của VLX. Kết quả nghiên cứu cung cấp công cụ đánh giá khoa học, sẵn sàng tích hợp vào quy trình thẩm định và đấu thầu các dự án CHK, SB tại Việt Nam.

Từ khóa: Vật liệu xanh; cảng hàng không, sân bay; khung đánh giá tiên tiến - AGMAF, phân tích thứ bậc - AHP; phát triển bền vững.

ABSTRACT

In the context of the rapid growth of Vietnam's aviation industry coupled with the Net Zero 2050 commitment, developing a specialized green material assessment criteria framework for airport infrastructure has become imperative. First, by synthesizing and analyzing international certification systems (LEED, BREEAM, Green Mark), domestic standards (LOTUS, Vietnam Standards - TCVN), national technical regulations, and specialized aviation requirements, a set of candidate criteria was established. Next, the AGMAF is structured according to the three sustainability pillars (Economic, environmental, social) with 10 groups of criteria, in which safety and fire protection are considered prerequisites. Finally, the weights of the pillars were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on a multi-stakeholder survey (management agencies, investors, contractors, consultants), resulting in priority levels and a very high degree of consensus on the necessity of green materials. The study provides a scientific assessment tool, ready to be integrated into the appraisal and bidding processes for airport projects in Vietnam.

Keywords: Green materials; airport advanced green material assessment framework - AGMAF; Analytic hierarchy process (AHP); sustainable development.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu, việc theo đuổi 17 mục tiêu phát triển bền vững (PTBV) của Liên Hợp Quốc đã trở thành kim chỉ nam cho mọi ngành kinh tế, trong đó HK là lĩnh vực chịu áp lực lớn về giảm phát thải [1]. Tại Hội nghị COP26, Việt Nam đã đưa ra cam kết mạnh mẽ đạt mức phát thải ròng bằng không, cam kết Net Zero carbon đến năm 2050 [2]. Để hiện thực hóa mục tiêu này, việc xanh hóa cơ sở hạ tầng, đặc biệt là hệ thống CHK, SB đóng vai trò then chốt. Theo quy hoạch mạng lưới CHK, SB thời kỳ từ 2021 đến 2030, Việt Nam sẽ khai thác 30 CHK và tầm nhìn đến năm 2050 sẽ nâng lên 33 cảng hàng không [3]. Vì vậy việc xây dựng và nâng cấp hệ thống hạ tầng HK hướng đến PTBV không chỉ là xu thế quốc tế mà còn là yêu cầu cấp bách để tối ưu hóa hiệu quả vận hành và giảm thiểu dấu chân carbon.

Bên cạnh đó, ngành Xây dựng hiện nay đang đứng trước áp lực chuyển dịch xanh vô cùng lớn khi tiêu thụ khoảng 40% nguồn năng lượng, chiếm 50% lượng phát thải và tạo ra tới 33% lượng khí thải carbon trên toàn cầu [4]. Đặc biệt, các công trình hạ tầng quy mô lớn như CHK, SB đang đối mặt với bài toán môi trường nghiêm trọng: việc sản xuất xi măng, thành phần cốt yếu trong đường băng và nhà

ga, là ngành có tỷ trọng phát thải khí nhà kính lớn nhất, chiếm gần 80% tổng phát thải trong sản xuất vật liệu xây dựng [5].

Trước thực trạng đó, nghiên cứu này xác định việc ứng dụng VLX là xu hướng tất yếu của thời đại. VLX được hiểu là những loại vật liệu sử dụng các nguồn tài nguyên thiên nhiên theo hướng tiếp cận có trách nhiệm với môi trường [6]. Các loại vật liệu này không chỉ đảm bảo không độc hại, có khả năng tái chế cao, mà còn giúp tiết kiệm tài nguyên và năng lượng trong suốt vòng đời từ khâu sản xuất đến khi thu hồi. Nghiên cứu này cũng góp phần giải quyết mâu thuẫn giữa nhu cầu mở rộng hạ tầng và trách nhiệm bảo vệ môi trường, hướng tới một tương lai phát thải thấp bền vững.

Dù các hệ thống chứng nhận như LEED (Mỹ) hay BREEAM (Anh) đã xác lập những tiêu chuẩn khắt khe về môi trường, việc áp dụng chúng tại Việt Nam vẫn đối mặt với rào cản về chi phí đầu tư ban đầu và sự thiếu hụt kinh nghiệm của nhà thầu. Đáng chú ý, với sự tương đồng về điều kiện khí tượng, hệ thống Green Mark từ Singapore được đánh giá là hướng tiếp cận khả thi và dễ thích ứng hơn cho thị trường nội địa. Để thúc đẩy lộ trình này, Chính phủ Việt Nam đã ban hành hệ thống văn bản pháp lý chặt chẽ như Nghị định 06/2022/NĐ-CP về giảm phát thải khí nhà kính và Quyết định 1266/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng đến năm 2050 [7], [8].

Tuy nhiên, một khoảng trống nghiên cứu lớn đang tồn tại, hiện vẫn thiếu một khung đánh giá VLX chuyên biệt cho hạ tầng CHK, SB phù hợp với các yếu tố đặc thù về khí hậu, kinh tế và pháp lý tại Việt Nam. Đứng trước thực trạng đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm ba mục tiêu cốt lõi: (i) Xây dựng Khung đánh giá VLX tiên tiến có khả năng định lượng và phù hợp với điều kiện Việt Nam; (ii) Lượng hóa mức độ ưu tiên các tiêu chí lựa chọn VLX của các trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội trong lĩnh vực HK; và (iii) Nhận diện các rào cản thực tế để đề xuất giải pháp ứng dụng VLX hiệu quả. Việc giải quyết những mục tiêu này nhằm tạo cơ sở để tối ưu hóa vòng đời công trình, góp phần đưa ngành HK Việt Nam tiệm cận với các chuẩn mực bền vững toàn cầu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Một công trình xây dựng không thể đạt được kết quả tốt nhất ở tất cả các khía cạnh bền vững, mà phải là sự cân bằng giữa các tiêu chí kinh tế - môi trường và xã hội [12]. Trên cơ sở đó, mục tiêu cốt lõi của VLX trong nghiên cứu này được xác định là đạt được sự tối đa hóa giữa ba trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội. Nghiên cứu được tiến hành theo phương pháp tổng hợp và phân tích những chính sách và quy chuẩn chủ yếu hiện hành để đề xuất nhóm tiêu chí ứng viên phù hợp với 3 trụ cột chính và 10 nhóm tiêu chí bao gồm: (i) Nhóm kinh tế: Hiệu suất và độ bền, Năng lượng tiêu thụ, Chi phí vòng đời; (ii) Nhóm môi trường: Nguồn gốc và thành phần vật liệu, tác động vòng đời, quản lý và giảm thiểu tác động; và (iii) Nhóm xã hội: Chất lượng môi trường trong nhà, khả năng tiếp cận và chuỗi cung ứng, tác động đến cộng đồng, sáng kiến và hiệu suất.

Bên cạnh đó, để tăng tính thực tiễn trong kết quả, nghiên cứu sử dụng phương pháp khảo sát chuyên gia trong lĩnh vực bằng bảng câu hỏi, đây được xem là một kỹ thuật định lượng phổ biến để đánh giá nhận thức xây dựng công trình xanh. Đối tượng tham gia khảo sát nghiên cứu bao gồm các chuyên gia đa bên liên quan như kỹ sư, kiến trúc sư, chuyên gia tư vấn và quản lý khai thác CHK, SB... Cấu trúc bảng hỏi gồm ba phần: (i) Thông tin chung (thu thập dữ liệu nhân khẩu học và kinh nghiệm chuyên môn), (ii) Đánh giá nhận thức (khảo sát hiểu biết về VLX trong hạ tầng HK); và (iii) Đánh giá tầm quan trọng (sử dụng thang đo Likert 5 mức độ từ 1 là rất không quan trọng đến 5 là rất quan trọng để xác định mức độ ưu tiên của các tiêu chí trong khung AGMAF).

Kết quả khung tiêu chí đánh giá AGMAF được tổng hợp dựa trên các tiêu chuẩn và quy chuẩn cùng với hệ thống chứng nhận VLX hiện hành. Để xác định trọng số ưu tiên một cách khách quan, nghiên cứu áp dụng phương pháp AHP của Thomas L. Saaty [9]. AHP cho phép cấu trúc hóa các thông tin phức tạp thành mô hình phân cấp, kết hợp giữa các yếu tố định tính là kinh nghiệm của chuyên gia và định lượng là số liệu thống kê. Thông qua việc thực hiện so sánh cặp, phương pháp này giúp triệt tiêu các yếu tố cảm tính và xác định chính xác các trọng số của từng tiêu chí trong việc tối ưu hóa lựa chọn vật liệu cho các CHK, SB tại Việt Nam.

3. KẾT QUẢ

3.1. Thiết lập tiêu chí ứng viên cho VLX

Qua quá trình rà soát hệ thống chứng nhận quốc tế và quy định hiện hành, nghiên cứu đã xác lập một ma trận đối chiếu nhằm nhận diện các yêu cầu cốt lõi đối với VLX với phạm vi từ quốc tế đến trong nước bao gồm:

(i) Hệ thống chứng nhận quốc tế: Cung cấp nền tảng lý thuyết và các chỉ số định lượng khắt khe về tính bền vững của vật liệu.

+ LEED (Mỹ) và BREEAM (Anh): Xác lập những yêu cầu trọng yếu đối với việc minh bạch hóa nguồn gốc cùng thành phần cấu tạo của vật liệu thông qua công bố sản phẩm môi trường (EPD). Đáng chú ý, các nhóm tiêu chí về vật liệu và nguồn lực trong hai hệ thống này có xu hướng chuyển dịch sang đánh giá tác động vòng đời (LCA), tạo cơ sở khoa học để kiểm soát và tiết giảm các hệ lụy môi trường từ quá trình khai thác tài nguyên [10], [11].

+ Green Mark (Singapore): Do có sự tương đồng chặt chẽ về điều kiện khí tượng nhiệt đới ẩm. Hệ thống này được xem như là khung tham chiếu phù hợp với việc ưu tiên các vật liệu có hiệu suất nhiệt cao, giúp giảm thiểu bức xạ và tối ưu hóa hệ thống làm mát, vốn là yêu cầu cốt lõi tại thị trường nội địa.

(ii) Hệ thống chứng nhận, tiêu chuẩn và quy chuẩn trong nước: Kiểm soát đảm bảo tính pháp lý và sự phù hợp với chuỗi cung ứng tại Việt Nam.

+ QCVN và TCVN: Các quy chuẩn như QCVN 09:2017/BXD và các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia xác lập các tiêu chí về an toàn và hiệu suất, đặc biệt là khả năng chống cháy, chịu lực. Đồng thời, đây cũng là căn cứ để định hình các yêu cầu về hiệu suất và độ bền của vật liệu trong môi trường khắc nghiệt tại Việt Nam.

+ LOTUS: Đóng vai trò bản địa hóa các tiêu chuẩn xanh tại Việt Nam giúp xác lập tiêu chí về ưu tiên vật liệu địa phương và vật liệu không nung từ đó tăng khả năng tiếp cận và chuỗi cung ứng. Bên cạnh đó, các yêu cầu về kiểm soát VOC và tiện nghi nhiệt trong LOTUS nhằm nâng cao chất lượng môi trường trong nhà.

(iii) Yêu cầu đặc thù ngành HK: Với cường độ khai thác cực cao và yêu cầu an ninh nghiêm ngặt, CHK, SB cần quan tâm đến các tiêu chí đặc thù liên quan:

+ Chi phí vòng đời (LCC): Với quy mô đầu tư lớn, vật liệu trong CHK, SB phải được đánh giá dựa trên hiệu quả kinh tế dài hạn thay vì chi phí đầu tư ban đầu.

+ Tác động đến cộng đồng: Theo các hướng dẫn của ICAO và IATA, vật liệu trong nhà ga cần thể hiện tính biểu tượng, bản sắc văn hóa và đảm bảo tính hòa nhập, dễ tiếp cận cho mọi đối tượng hành khách [12].

+ An toàn và hiệu suất vận hành: Yêu cầu về độ bền mài mòn, khả năng bảo trì nhanh chóng và các tiêu chuẩn an toàn cháy nổ đặc biệt (dành cho nơi tập trung đông người) là rào cản kỹ thuật bắt buộc để một loại vật liệu được sử dụng cho công trình CHK, SB [13].

Trên cơ sở tổng hợp đa chiều trên, nghiên cứu đã thiết lập một bộ tiêu chí ứng viên làm khung tham chiếu để lựa chọn VLX tối ưu cho các dự án với quy mô công trình hạ tầng lớn như CHK, SB. Hệ tiêu chí này được cấu trúc theo 3 nhóm trọng tâm về kinh tế - xã hội và môi trường bao gồm 10 tiêu chí ứng viên gồm: (i) Hiệu suất và độ bền; (ii) Năng lượng tiêu thụ; (iii) Chi phí vòng đời - LCC; (iv) Nguồn gốc và thành phần; (v) Tác động đến vòng đời - LCA; (vi) Quản lý và giảm thiểu tác động; (vii) Chất lượng môi trường trong nhà; (viii) Khả năng tiếp cận và chuỗi cung ứng; (ix) Tác động đến cộng đồng; và (x) An toàn và hiệu quả.

3.2. Thiết lập khung đánh giá tiên tiến cho VLX

3.2.1. Nhóm tiêu chí kinh tế

Nhóm tiêu chí kinh tế được xem là ưu tiên cao nhất trong ba trụ cột kinh tế - môi trường và xã hội như một lựa chọn chiến lược và thực tiễn tại Việt Nam. Bằng cách tập trung vào các thông số có tác động trực tiếp như hệ số hấp thụ nhiệt và độ phản xạ bức xạ mặt trời (SRI). Hệ thống đánh giá này không chỉ đảm bảo độ bền kết cấu trong điều kiện vận hành khắc nghiệt (50-100 năm) mà còn trực tiếp tối ưu hóa lợi ích tài chính thông qua việc cắt giảm chi phí năng lượng vận hành hàng năm. Cách tiếp cận này giúp chủ đầu tư có cái nhìn tổng quát, đảm bảo sự cân bằng giữa mục tiêu bảo vệ môi trường và tính bền vững tài chính dài hạn cho công trình.

Bảng 1. Khung tiêu đánh giá tiên tiến cho nhóm tiêu chí kinh tế *(Nguồn: Nhóm tác giả)*

Nội dung		Ưu tiên	Trọng số
Hiệu suất và độ bền	Cường độ chịu lực	3	25,5
	Độ bền mỏi	4	24,8
	Khả năng chống thấm và chống ăn mòn	2	26,05
	Tuổi thọ thiết kế và duy trì chức năng	1	27,55
Năng lượng tiêu thụ	Khả năng cách nhiệt	1	24,75
	Độ phản xạ bức xạ mặt trời (SRI)	2	25,15
	Hệ số hấp thụ nhiệt mặt trời	1	25,70
Chi phí vòng đời	Giảm chi phí vòng đời (LCC)	2	23,70
	Chi phí đầu tư và đánh giá vật liệu	1	23,95

3.2.2. Nhóm tiêu chí môi trường

Nhóm tiêu chí về môi trường được xem là chiến lược của ngành HK Việt Nam hướng tới mục tiêu NetZero thông qua việc kiểm soát nghiêm ngặt vòng đời vật liệu (LCA). Hệ thống ưu tiên tối đa cho các vật liệu tái sử dụng, có thành phần tái chế và hàm lượng các-bon tích hợp thấp. Việc kết hợp quản lý chất thải công trình và ưu tiên nguồn cung địa phương không chỉ tối ưu hóa chuỗi cung ứng, giảm chi phí vận chuyển mà còn đóng vai trò là công cụ kiểm chứng khách quan cho tính bền vững, đảm bảo sự hài hòa giữa trách nhiệm sinh thái và hiệu quả đầu tư dài hạn.

Bảng 2. Khung tiêu đánh giá tiên tiến cho nhóm tiêu chí môi trường *(Nguồn: Nhóm tác giả)*

Nội dung		Ưu tiên	Trọng số
Nguồn gốc và thành phần vật liệu	Vật liệu tái sử dụng	1	23,80
	Vật liệu có thành phần tái chế	3	22,85
	Vật liệu tái tạo nhanh, không nung	4	21,05
	Vật liệu có nguồn gốc địa phương	2	23,05
Tác động vòng đời	carbon tích hợp	2	23,25
	Vật liệu có EPDs	2	23,20
	Vật liệu có chứng nhận xanh	1	23,85
Quản lý và giảm thiểu tác động	Quản lý chất thải từ sản xuất vật liệu	2	24,85
	Quản lý chất thải từ xây dựng	1	25,85
	Giảm mức sử dụng bê tông	3	24,15

3.2.3. Nhóm tiêu chí xã hội

Với vai trò vừa mang tính nhân văn vừa mang tính thiết yếu, nhóm tiêu chí này góp phần khẳng định vị thế của các CHK, SB không chỉ là công trình kỹ thuật mà còn là không gian văn hóa xã hội. Hệ thống ưu tiên hàng đầu cho các chỉ số về chất lượng môi trường trong nhà thông qua việc kiểm soát hàm lượng hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOC) và hiệu suất vật liệu vượt trội. Việc tích hợp các tiêu chuẩn về sức khỏe hành khách và tính sẵn sàng của chuỗi cung ứng không chỉ đảm bảo an toàn sinh kế mà còn nâng cao trải nghiệm người dùng. Đây là yêu cầu nền tảng để hoàn thiện giá trị cốt lõi, tạo dựng không gian tối ưu lấy con người làm trung tâm.

Bảng 3. Khung tiêu đánh giá tiên tiến cho nhóm tiêu chí xã hội *(Nguồn: Nhóm tác giả)*

Nội dung		Ưu tiên	Trọng số
Chất lượng môi trường trong nhà	Hàm lượng hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOC) thấp	2	23,45
	Hàm lượng Formaldehyde thấp	1	24,6
Khả năng tiếp cận và chuỗi cung ứng	Vật liệu sẵn sàng cung ứng	1	24,75
Tác động đến cộng đồng	Tạo việc làm cho địa phương	1	24,6
An toàn và hiệu suất	An toàn PCCC	1	25,65
	Hiệu suất vượt trội và đổi mới giải pháp vật liệu	2	24,35

4. THẢO LUẬN

Xây dựng hệ thống đánh giá tiên tiến cho VLX với 3 nhóm tiêu chí kinh tế - môi trường và xã hội với điều kiện tiên quyết là mọi vật liệu phải đáp ứng nghiêm ngặt các tiêu chuẩn về an toàn PCCC theo QCVN và quốc tế. Cả ba khía cạnh này đều có vai trò riêng biệt và không thể thay thế trong một đánh giá bền vững toàn diện cho các dự án CHK, SB thế hệ mới tại Việt Nam. Dựa trên kết quả phân tích bằng phương pháp AHP, khung đánh giá tiên tiến cho VLX tại CHK, SB được xác lập với cấu trúc trọng số ưu tiên hóa nhằm đảm bảo tính khả thi và bền vững. Kết quả khảo sát đa bên với mức độ đồng thuận cao đã xác thực tính thực chứng của khung AGMAF trong việc đáp ứng nhu cầu thực tiễn trong CHK SB. Nhóm tiêu chí Kinh tế đã khẳng định được xu hướng ưu tiên hiệu quả tài chính thông qua chi phí vòng đời (LCC) thay vì chi phí đầu tư ban đầu. Trong đó tiêu chí về tuổi thọ và độ bền mỏi chiếm trọng số cao nhất 27,55 và 24,80 được xem là những định hướng cốt lõi giúp quản lý dự án dài hạn. Nhóm tiêu chí về Môi trường hướng đến hiện thực hóa lộ trình Net Zero carbon vào năm 2050 tiêu chí ưu tiên lựa chọn vật liệu có chứng nhận xanh với trọng số 23,85 và vật liệu có khả năng tái sử dụng 23,8. Mặc dù chiếm tỷ trọng thấp nhất nhưng nhóm tiêu chí về xã hội vẫn giữ vai trò thiết yếu trong việc tối ưu hóa chất lượng môi trường trong nhà và đảm bảo an

toàn PCCC, điều kiện tiên quyết đối với các công trình đặc thù như CHK, SB.

Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng nhận diện được các rào cản chính bao gồm sự thiếu hụt tiêu chuẩn kỹ thuật chuyên biệt cho hạ tầng HK trong hệ thống TCVN và QCVN với cơ chế đấu thầu hiện hành chưa chú trọng chi phí vòng đời (LCC). Đồng thời sự thiếu vắng cơ sở dữ liệu quốc gia về đánh giá vòng đời (LCA) là điểm nghẽn cần được xử lý. Tổng thể, AGMAF đã lấp đầy những khoảng trống lý thuyết bằng một hệ thống tiêu chí hài hòa đồng thời đặt ra những yêu cầu về việc điều chỉnh chính sách để phát triển bền vững hơn. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi cần tiếp tục nhận diện và tháo gỡ các rào cản về tài chính và chính sách hỗ trợ nhằm thúc đẩy chuỗi cung ứng vật liệu bền vững trong tương lai.

Nhằm tối ưu hóa tính ứng dụng và hoàn thiện khung đánh giá AGMAF trong bối cảnh thực tiễn, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào ba định hướng trọng tâm: (i) Cần triển khai áp dụng thí điểm hệ thống tiêu chí này vào các dự án hạ tầng trọng điểm hiện nay như CHKQT Long Thành để kiểm chứng và hiệu chỉnh bộ trọng số dựa trên dữ liệu vận hành thực tế; (ii) Việc số hóa quy trình đánh giá thông qua nghiên cứu xây dựng phần mềm hỗ trợ quyết định hoặc tích hợp AGMAF vào mô hình thông tin công trình là cần thiết để tự động việc tính toán dấu chân các-bon và tối ưu lựa chọn vật liệu ngay từ giai đoạn thiết kế sơ bộ; và (iii) Nghiên cứu cần đi sâu vào việc xây dựng hệ thống định mức kinh tế kỹ thuật và cơ chế tài chính xanh cho vật liệu bền vững trong ngành HK, nhằm tháo gỡ các rào cản về chi phí và pháp lý đã được nhận diện trong nghiên cứu này.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã giải quyết khoảng trống về một khung đánh giá VLX chuyên biệt cho hạ tầng HK tại Việt Nam dựa trên ba trụ cột chính kinh tế - môi trường và xã hội. Kết quả nghiên cứu giúp chuẩn hóa các tiêu chí đồng thời nhận diện các rào cản thực tế trong chuỗi cung ứng vật liệu, chi phí và pháp lý. Đây là cơ sở khoa học quan trọng hỗ trợ các nhà quản lý và đơn vị phát triển CHK lựa chọn vật liệu tối ưu, góp phần hiện thực hóa mục tiêu hạ tầng xanh và PTBV ngành HK Việt Nam trong tương lai. Nếu được ứng dụng rộng rãi, kết quả này sẽ thúc đẩy thị trường vật liệu bền vững nội địa, chuẩn hóa quy trình xây dựng hạ tầng CHK SB và trực tiếp đóng góp vào mục tiêu giảm phát thải quốc gia.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Học viện Hàng không Việt Nam đã hỗ trợ và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Liên Hợp Quốc Việt Nam. Các mục tiêu phát triển bền vững tại Việt Nam. Internet: https://vietnam.un.org/vi/sdgs (truy cập tháng 03/2026).

[2] Minh Hạnh. Việt Nam triển khai các cam kết khí hậu tại COP26, Bộ Nông nghiệp và Môi trường, ngày 30/09/2025. Internet: https://mae.gov.vn/viet-nam-trien-khai-cac-cam-ket-khi-hau-tai-cop26-19890.htm (truy cập tháng 03/2026).

[3] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 648/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch tổng thể phát triển hệ thống Cảng hàng không, Sân bay toàn quốc thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến 2050, ngày 07/06/2023. Internet: https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Xay-dung-Do-thi/Quyet-dinh-648-QD-TTg-2023-phat-trien-he-thong-cang-hang-khong-san-bay-toan-quoc-2021-2030-568857.aspx (truy cập tháng 03/2026).

[4] Hà An. Xanh hóa vật liệu xây dựng, Tạp chí Kiến trúc, ngày 09/05/2024. Internet: https://www.tapchikientruc.com.vn/chuyen-muc/xanh-hoa-vat-lieu-xay-dung.html (truy cập tháng 03/2026).

[5] Giảm phát thải khí nhà kính trong sản xuất xi măng, Tạp chí Điện tử Thiên nhiên và Môi trường, ngày 25/01/2024. Internet: https://moitruongachau.com/vn/giam-phat-thai-khi-nha-kinh-trong-san-xuat-xi-mang.html (truy cập tháng 03/2026).

[6] Nguyễn Thị Tâm, Lê Cao Chiến. Vật liệu xây dựng xanh - Xu thế của tương lai, Tạp chí Xây dựng, ngày 08/08/2022. Internet: https://tapchixaydung.vn/vat-lieu-xay-dung-xanh-xu-the-cua-tuong-lai-20201224000012929.html (truy cập tháng 03/2026).

[7] Chính phủ. Nghị định 06/2022/NĐ-CP Quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn, ngày 07/01/2022. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=205039 (truy cập tháng 03/2026).

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định 496/QĐ-TTg, về việc ban hành kế hoạch quốc gia về quản lý, loại trừ các chất làm suy giảm tầng ô-dôn, chất gây hiệu ứng nhà kính được kiểm soát, (2024). Internet: https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Quyet-dinh-496-QD-TTg-2024-Ke-hoach-quoc-gia-loai-tru-chat-lam-suy-giam-tang-o-don-613308.aspx (truy cập tháng 03/2026).

[9] Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York ; London : McGraw-Hill International Book Co. (1980).

[10] U.S. Green Building Council (USGBC). LEED v4.1 Building Design and Construction Guide.

[11] Building Research Establishment (BRE). BREEAM International New Construction Technical Guide.

[12] International Air Transport Association (IATA). Airport Terminals Reference Manual (ATRM).

[13] International Civil Aviation Organization (ICAO). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes.

■Ngày nhận bài: 08/4/2026 ■Ngày sửa bài: 20/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/4/2026

Sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng hợp kim nhớ hình

Repair and strengthening of reinforced concrete structures using shape memory alloys

> TS BÙI THANH QUANG
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: thanhquang.bui@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloy - SMA) là một loại vật liệu thông minh có khả năng tạo ứng suất phục hồi thông qua chuyển pha nhiệt - cơ, mở ra hướng tiếp cận mới trong sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Bài báo trình bày tổng quan về nguyên lý làm việc của SMA, các giải pháp gia cường kết cấu BTCT sử dụng SMA, cũng như cơ chế cải thiện khả năng chịu lực của cấu kiện. Cuối cùng, bài báo so sánh phương pháp gia cường bằng SMA với các phương pháp gia cường truyền thống và đề xuất các hướng nghiên cứu trong tương lai.

Từ khóa: SMA; gia cường bê tông cốt thép; vật liệu thông minh.

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) are a class of smart materials capable of generating recovery stresses through thermo-mechanical phase transformations, offering a novel approach for the repair and strengthening of reinforced concrete structures. This paper presents an overview of the working principles of SMA, the strengthening techniques for RC structures using SMA, as well as the mechanisms by which the load-carrying capacity of structural members is enhanced. Finally, the paper compares SMA-based strengthening with conventional methods and proposes directions for future research.

Keywords: Shape memory alloys; reinforced concrete; structural strengthening; smart materials.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, kết cấu BTCT được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp, bao gồm xây dựng, giao thông, thủy lợi và kiến trúc. Trong quá trình sử dụng, dưới tác động của tải trọng và môi trường, kết cấu có thể bị hư hỏng, dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực. Vì vậy, để đảm bảo hiệu quả làm việc và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật, cần thực hiện các biện pháp sửa chữa kịp thời và phù hợp.

Trong số các giải pháp hiện có, việc sử dụng vật liệu thông minh, đặc biệt là hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloys - SMA), đã nổi lên như một hướng tiếp cận đầy tiềm năng trong lĩnh vực gia cường và sửa chữa kết cấu. So với các vật liệu gia cường truyền thống như polymer cốt sợi (Fiber Reinforced Polymer - FRP), SMA có nhiều ưu điểm nổi bật như khả năng tạo ứng suất kéo trước thông qua quá trình kích hoạt nhiệt, tính tương thích tốt với bê tông, cũng như chi phí hợp lý hơn trong các ứng dụng quy mô lớn.

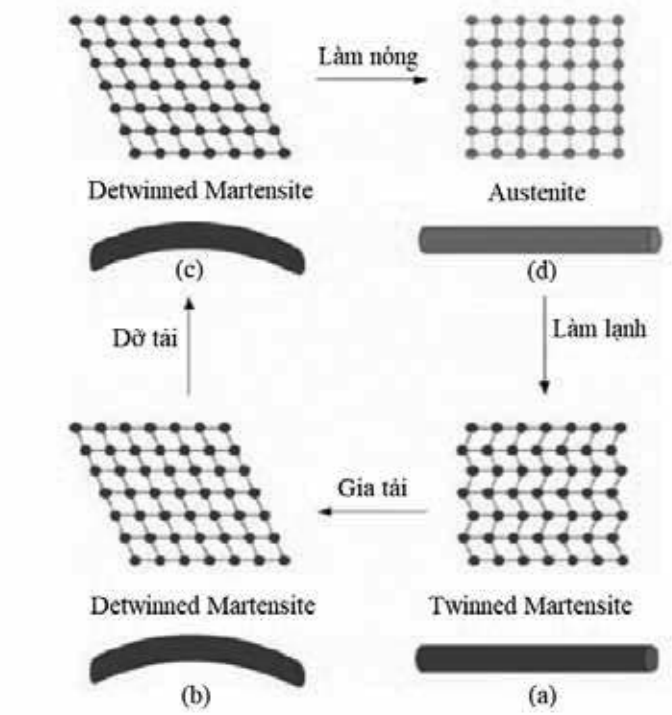
Cơ chế gia cường bằng SMA dựa trên việc tạo ra biến dạng trước trong vật liệu, sau đó kích hoạt bằng nhiệt để sinh ra ứng suất phục hồi, từ đó tạo hiệu ứng tương tự như dự ứng lực ngoài. Điều này cho phép cải thiện đáng kể độ cứng uốn, tăng tải trọng phá hoại và hạn chế sự phát triển của vết nứt trong dầm BTCT. Bên cạnh đó, so với FRP vốn chủ yếu làm việc theo cơ chế gia cường thụ động, SMA có khả năng cung cấp trạng thái ứng suất chủ động, qua đó nâng cao hiệu quả làm việc tổng thể của hệ kết cấu.

Mục tiêu của bài báo là phân tích cơ chế gia cường của SMA và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng SMA trong gia cường kết cấu BTCT.

2. GIỚI THIỆU VỀ HỢP KIM NHỚ HÌNH

Hợp kim nhớ hình (Shape Memory Alloys - SMA) là một loại vật liệu thông minh có đặc tính cơ - nhiệt đặc biệt, nổi bật nhất là khả năng phục hồi hình dạng ban đầu khi chịu các tác động bên ngoài như nhiệt độ hoặc từ trường. Hiện tượng khôi phục hình dạng này được gọi là hiệu ứng nhớ hình (Shape Memory Effect - SME). Về bản chất, SME xuất phát từ quá trình chuyển pha thuận nghịch giữa hai cấu trúc tinh thể đặc trưng của vật liệu, bao gồm pha martensite và pha austenite. Trong đó, pha austenite tồn tại ở vùng nhiệt độ cao còn pha martensite tồn tại ở nhiệt độ thấp hơn [1]. Khi pha martensite hình thành, các tinh thể không xuất hiện theo một cấu hình duy nhất mà tồn tại dưới nhiều trạng thái khác nhau, được gọi là các biến thể. Sự phân bố và sắp xếp của các biến thể này dẫn đến hai dạng cấu trúc martensite đặc trưng: (i) martensite song tinh (twinned martensite - M^t), trong đó các biến thể được sắp xếp đối

xứng và không tạo ra biến dạng vĩ mô; (ii) martensite khử song tinh (detwinned martensite - M^d), hình thành khi các biến thể bị tái sắp xếp dưới tác dụng của tải trọng cơ học, dẫn đến biến dạng đáng kể ở cấp độ vật liệu. Quá trình chuyển pha từ martensite sang austenite khi gia nhiệt là cơ chế cốt lõi tạo nên hiệu ứng nhớ hình của SMA. Sự chuyển pha này mang tính thuận nghịch và có thể được mô tả thông qua các chu trình nhiệt - cơ, như minh họa trong Hình 1 [5].



Hình 1. Hiệu ứng nhớ hình trong hợp kim [5]

Dưới tác dụng của tải trọng cơ học, vật liệu ở pha martensite song tinh có thể trải qua quá trình khử song tinh thông qua sự tái định hướng của các biến thể martensite, dẫn đến sự thay đổi hình dạng của vật liệu. Đáng chú ý, biến dạng sau khi khử song tinh được duy trì ngay cả khi tải trọng được dỡ bỏ, do cấu trúc vi mô đã chuyển sang trạng thái martensite định hướng. Khi vật liệu được gia nhiệt vượt qua nhiệt độ chuyển pha đặc trưng, cấu trúc martensite khử song tinh sẽ biến đổi sang pha austenite. Quá trình chuyển pha này đi kèm với sự phục hồi hoàn toàn hình dạng ban đầu của vật liệu. Ngược lại, khi làm nguội, vật liệu chuyển từ pha austenite trở lại pha martensite song tinh mà không gây ra biến dạng hình học bổ sung. Chu trình biến đổi thuận nghịch giữa hai pha cùng với khả năng phục hồi hình dạng như mô tả ở trên được gọi là hiệu ứng nhớ hình (SME).

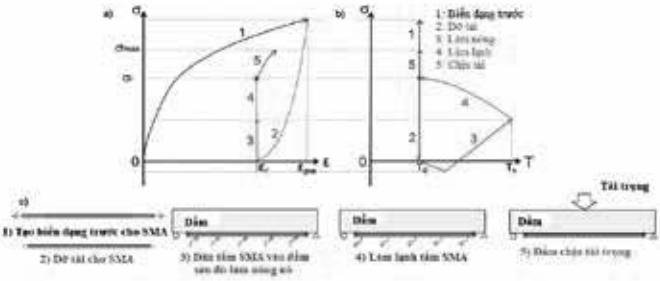
Các nghiên cứu về vật liệu nhớ hình bắt đầu từ đầu thế kỷ XX. Năm 1932, Ölande - nhà vật lý người Thụy Điển lần đầu đã phát hiện ra hiệu ứng nhớ hình trên hợp kim Au-Cd [2]. Hợp kim này có thể biến dạng dẻo khi gặp lạnh và trở lại hình dạng ban đầu khi bị đốt nóng. Năm 1962, Buehler và Wang đã tìm ra SME trong hợp kim Ni-Ti [3, 4], sau này được biết đến với tên gọi Nitinol. Hợp kim Ni-Ti được sản xuất rẻ, an toàn và có tính chất cơ học tốt hơn so với các SMA khác vào thời điểm đó. Đến năm 1986, ứng dụng thương mại của hợp kim Ni-Ti đã phát triển trong nhiều lĩnh vực do nhu cầu ngày càng lớn về các bộ truyền động nhẹ hơn và nhỏ gọn hơn, đặc biệt là trong lĩnh vực y sinh [5]. Tuy nhiên, chi phí cao và mô-đun đàn hồi thấp đã cản trở việc ứng dụng của hợp kim Ni-Ti trong các công trình xây dựng.

Nhằm khắc phục các hạn chế này, các hợp kim nhớ hình nền sắt (Fe-SMA), đặc biệt là hệ Fe-Mn-Si đã thu hút sự quan tâm đáng kể. Hiệu ứng SME trong hợp kim Fe-Mn-Si lần đầu tiên được báo cáo bởi Sato và cộng sự vào năm 1982 [6]. Đáng chú ý, chi phí của hợp kim Fe-Mn-Si chỉ bằng khoảng 1/20 so với hợp kim Ni-Ti [7]. Bên cạnh đó, loại vật liệu này còn thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội về khả năng gia công, tính hàn, khả năng tạo hình và đặc trưng trễ chuyển pha rộng [8]. Các nghiên cứu hiện đại cho thấy Fe-SMA là vật liệu gia cường đầy tiềm năng trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng, với nhiều kết quả thực nghiệm và ứng dụng thực tế đã đạt được hiệu quả đáng kể.

3. SỬA CHỮA, GIA CƯỜNG KẾT CẤU BTCT BẰNG HỢP KIM NHỚ HÌNH

Hợp kim nhớ hình (SMA) được ứng dụng trong gia cường kết cấu BTCT dựa trên khả năng tạo ứng suất phục hồi thông qua quá trình chuyển pha nhiệt - cơ. Hình 2 trình bày nguyên lý gia cường kết cấu BTCT bằng SMA. Ban đầu, SMA được được kéo trước đến mức biến dạng ε_{pre} trạng thái martensite (Hình 2a, đường 1) ở nhiệt độ T_0. Sau đó, vật liệu được dỡ tải, để lại một biến dạng dư ε_r (Hình 2a đường 2). Ở trạng thái này, SMA được liên kết với cấu kiện cần gia cường thông qua các phương pháp neo cơ học hoặc bằng keo dính, trong khi vẫn duy trì trạng thái biến dạng. Tiếp theo, SMA được gia nhiệt đến nhiệt độ kích hoạt T_s (Hình 2b, đường 3) để kích hoạt chuyển sang trạng thái austenite và sau đó được làm nguội trở lại nhiệt độ ban đầu T_0. Do bị ràng buộc bởi kết cấu xung quanh, biến dạng phục hồi của SMA không thể phát triển tự do, dẫn đến sự hình thành ứng suất kéo trong SMA. Hệ quả là trong cấu kiện BTCT xuất hiện ứng suất nén, góp phần cải thiện khả năng chịu lực và độ cứng của kết cấu. Về bản chất cơ học, cơ chế này tương đương với một hệ dự ứng lực. SMA không đơn thuần là vật liệu gia cường, mà đóng vai trò như một hệ dự ứng lực, tạo ra trạng thái ứng suất chủ động trong kết cấu - điều mà các phương pháp như FRP không thể đạt được.

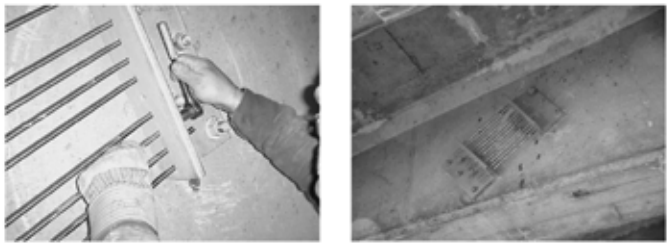
Bên cạnh hiệu ứng dự ứng lực, SMA còn thể hiện một cơ chế đặc biệt trong việc kiểm soát vết nứt. Khác với các vật liệu gia cường thụ động như FRP, SMA có khả năng tạo ra lực kéo ngược tác dụng trực tiếp lên hai mặt vết nứt, từ đó làm giảm độ mở của các vết nứt đã hình thành. Cơ chế này có thể được xem như một dạng "tự khép kín vết nứt" trong điều kiện làm việc của kết cấu. Nhờ đó, SMA không chỉ có tác dụng trì hoãn sự hình thành vết nứt, mà còn góp phần làm giảm sự phát triển của vết nứt trong quá trình khai thác, từ đó cải thiện đáng kể độ bền lâu của kết cấu.



Hình 2. Nguyên lý gia cường kết cấu BTCT bằng SMA [9]

Hợp kim nhớ hình SMA lần đầu tiên được ứng dụng trong lĩnh vực sửa chữa kết cấu vào năm 2001, trong một dự án xử lý các vết nứt cục bộ của cầu tại Michigan, Hoa Kỳ [10]. Do khả năng chịu cắt của bê tông không đáp ứng yêu cầu, các vết nứt có độ mở lên tới 0,55 mm đã xuất hiện trong dầm bê tông mặt cắt chữ T. Để khắc phục hiện tượng này, một hệ thống thanh hợp kim Fe-Mn-Si-Cr đã được sử dụng (Hình 3). Nhờ đó, độ mở của các vết nứt đã được

giảm đáng kể, lên tới khoảng 40%, cho thấy hiệu quả rõ rệt của công nghệ SMA trong sửa chữa và gia cường kết cấu bê tông.



Hình 3. Sửa chữa vết nứt cho dầm cầu, mặt cắt chữ T bằng BTCT tại Michigan [10]

Trong những năm gần đây, hợp kim nhớ hình nền sắt Fe-SMA đã được áp dụng rộng rãi trong gia cường cấu kiện BTCT, đặc biệt trong các bài toán chịu uốn và chịu cắt. Hình 4-5 mô tả một số công trình được gia cường uốn và cắt bằng Fe-SMA.

a) *b)*

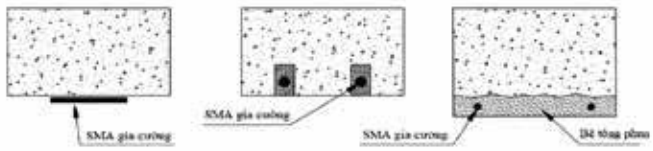
Hình 4. Gia cường uốn cho dầm cầu tại Courrendlin - Thụy Sỹ (a) và cho sàn tại gare ở Nussbaumen - Thụy Sỹ (b)

Hình 5. Gia cường cắt cho dầm cầu tại St.-Lesgier-Fenil - Thụy Sỹ

Mục tiêu của công tác sửa chữa và gia cường kết cấu BTCT bằng hợp kim nhớ hình (SMA) là bố trí vật liệu này tại các vùng chịu lực quan trọng, với phương đặt phù hợp với hướng truyền nội lực, nhằm nâng cao hiệu quả chịu lực của cấu kiện. Các phương pháp gia cường sử dụng SMA hiện nay chủ yếu bao gồm: Gia cường dán ngoài (Hình 6a), gia cường chôn gần bề mặt (Hình 6b) và gia cường bằng cách tích hợp SMA trong lớp bê tông phun (Hình 6c).

Trong phương pháp gia cường dán ngoài, vật liệu SMA được gắn trực tiếp lên bề mặt cấu kiện BTCT, tương tự như kỹ thuật gia cường bằng vật liệu FRP. Đối với phương pháp chôn gần bề mặt, các thanh hoặc dải SMA được đặt vào các rãnh được cắt sẵn gần bề mặt bê tông, sau đó được lấp đầy bằng keo epoxy hoặc vữa xi măng nhằm đảm bảo khả năng truyền lực và liên kết với bê tông nền. Trong khi đó, phương pháp tích hợp SMA trong lớp bê tông phun được thực hiện bằng cách bố trí vật liệu SMA trên bề mặt cấu kiện hiện hữu, sau đó phủ một lớp bê tông phun mới nhằm tạo thành một hệ gia cường tích hợp, vừa tăng cường khả năng chịu lực vừa cải thiện điều kiện làm việc tổng thể của cấu kiện.

Cần lưu ý rằng, hiệu quả của phương pháp gia cường bằng SMA phụ thuộc mạnh vào cơ chế bám dính giữa SMA và bê tông. Trong quá trình kích hoạt, SMA có thể sinh ra ứng suất phục hồi lớn, dẫn đến sự hình thành các ứng suất tiếp đáng kể tại bề mặt tiếp xúc. Nếu khả năng bám dính không đủ, hiện tượng trượt hoặc bóc tách có thể xảy ra, làm giảm đáng kể hiệu quả gia cường. Do đó, cơ chế tương tác bám dính giữa SMA và bê tông là một trong những yếu tố chi phối quan trọng, cần được nghiên cứu sâu hơn trong các mô hình tính toán và thiết kế.

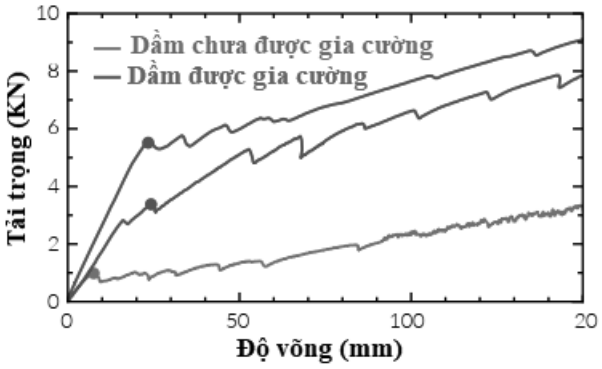


a) *b)* *c)*

Hình 6. Các giải pháp gia cường kết cấu BTCT bằng SMA [11]

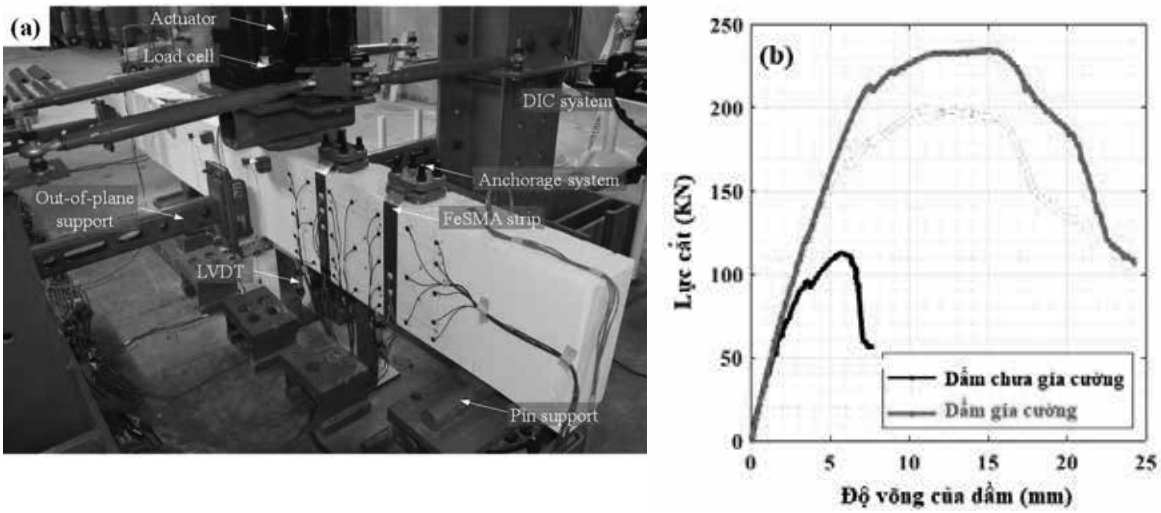
Các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra rằng, việc sử dụng hợp kim nhớ hình gốc sắt (Fe-SMA) trong gia cường kết cấu BTCT có thể cải thiện đáng kể hiệu quả làm việc của cấu kiện dưới cả tác dụng uốn và cắt. Đối với ứng xử uốn, Fe-SMA góp phần gia tăng khả năng chịu lực, giảm độ mở rộng vết nứt và nâng cao độ cứng của cấu kiện. Đối với ứng xử cắt, Fe-SMA ở trạng thái kích hoạt giúp làm giảm ứng suất kéo chính trong vùng chịu cắt, hạn chế sự hình thành và phát triển của các vết nứt xiên, đồng thời tăng cường khả năng chịu lực cắt và cải thiện độ dẻo của cấu kiện.

Hình 7 thể hiện biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng khi chịu uốn của dầm không được gia cường và dầm được gia cường bằng Fe-SMA [12]. Có thể nhận ra rằng, sau khi được gia cường, tải trọng gây nứt của dầm đã tăng từ 3 đến 5 lần so với dầm trước gia cường. Sự gia tăng này có thể được giải thích bởi hiệu ứng dự ứng lực do SMA tạo ra, nó làm giảm ứng suất kéo trong vùng bê tông chịu kéo và trì hoãn quá trình hình thành vết nứt và cải thiện độ cứng của cấu kiện.



Hình 7. Đường cong quan hệ tải trọng - độ võng của dầm BTCT trước và sau khi được gia cường uốn bằng vật liệu Fe- SMA [11]

Hình 8 thể hiện sơ đồ bố trí thí nghiệm và biểu đồ quan hệ lực cắt - độ võng khi chịu cắt của dầm không được gia cường và dầm được gia cường bằng Fe-SMA [13]. Trong thí nghiệm này, dầm BTCT có mặt cắt chữ nhật được gia cường cắt bằng cách sử dụng vật liệu Fe-SMA dạng bản, được bọc kín quanh chu vi mặt cắt. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc áp dụng Fe-SMA đã cải thiện đáng kể khả năng chịu cắt của dầm, sức kháng cắt của dầm đã tăng khoảng 2 lần so với dầm không gia cường. Hiệu quả này chủ yếu xuất phát từ việc SMA làm giảm ứng suất kéo chính trong vùng chịu cắt, qua đó hạn chế sự phát triển của các vết nứt xiên và cải thiện cơ chế truyền lực trong vùng này.



Hình 8. Sơ đồ bố trí thí nghiệm (a) và đường cong quan hệ lực cắt - độ võng của dầm BTCT trước và sau khi được gia cường cắt bằng vật liệu Fe- SMA(b) [13]

4. KẾT LUẬN

Hợp kim nhớ hình là một giải pháp gia cường tiên tiến có khả năng tạo dự ứng lực chủ động trong kết cấu BTCT. Khác với các phương pháp gia cường truyền thống, SMA không chỉ làm việc thụ động mà còn tạo ra ứng suất nội sinh thông qua quá trình chuyển pha. So với FRP, SMA có ưu điểm vượt trội trong kiểm soát vết nứt và khả năng làm việc chủ động. So với dự ứng lực ngoài, SMA có ưu điểm về thi công đơn giản và không yêu cầu hệ thống neo phức tạp. Tuy nhiên, hiệu quả gia cường bằng SMA phụ thuộc mạnh vào cơ chế bám dính giữa SMA và bê tông, cũng như điều kiện kích hoạt vật liệu. Do đó, cần có các nghiên cứu sâu hơn về tương tác SMA-bê tông, về điều kiện kích hoạt vật liệu, về tuổi thọ của kết cấu sau gia cường cũng như xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lagoudas, D. C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. New York: Springer, 2008.

[2] Ölander, A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. Journal of the American Chemical Society 54, pp. 3819-3833, 1932.

[3] Buehler W.J., Gilfrich J.V., Wiley R.C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. Applied Physics 34, p. 1475, 1963.

[4] Wang F.E., Buehler W.J., Pickart S.J. TiNi's unique crystal structure and martensite transition, Journal of Applied Physics 36, p. 3232, 1965.

[5] Melton K., Simpson J., Duerig T. A new wide lagged shape memory alloy based on NiTi and its applications. Proceedings of the International Conference on Martensitic Transforms. ICOMAT-86, 1986.

[6] Sato, A.; Chishima, E.; Soma, K.; Mori, T. Shape Memory Effect in Transformation in Fe-30Mn-1Si Alloy Single Crystals. Acta Metallurgica 30, pp. 1177-1183, 1982.

[7] Zhou, L. Research of Fe-Mn-Si Based Shape Memory Alloy and Its Coupler. Master's Thesis, Fuzhou University, Fuzhou, China, 2004.

[8] Tiwari, N.D.; Gogoi, A.; Hazra, B.; Wang, Q. A Shape Memory Alloy-Tuned Mass Damper Inerter System for Passive Control of Linked-SDOF Structural Systems under Seismic Excitation. Journal of Sound and Vibration 494, p.115893, 2021.

[9] Hilscher, M.; Jübner, P.; Ghafoori, E. Iron-Based Shape Memory Alloys in Construction: A Review of Research, Applications and Challenges. Shape Memory and Superelasticity 11, pp. 363-377, 2025.

[10] Soroushian, P., Ostowari, K., Nossoni, A., Chowdhury, H. Repair and Strengthening of Concrete Structures through Application of Corrective Posttensioning Forces with Shape Memory Alloys. Transportation Research Record 1770, pp. 20-26, 2001.

[11] Raza, S.; Shafei, B.; Saiidi, M.S.; Motavalli, M.; Shahverdi, M. Shape memory alloy reinforcement for strengthening and self-centering of concrete structures State of the art. Construction and Building Materials 314: 126628, 2022.

[12] Memory-steel prestressing techniques for strengthening and new construction under static and dynamic loading. Internet: https://www.re-fer.eu.

[13] Hong, H.; Belarbi, A.; Gencturk, B.; Zerbe, L. Shear strengthening of rectangular and T-shaped reinforced concrete beams with iron-based shape memory alloy (FeSMA) strips. Engineering Structures 345, 121423, 2025.

■Ngày nhận bài: 24/3/2026 ■Ngày sửa bài: 01/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 10/4/2026

Nghiên cứu hiện tượng carbonat hóa của vữa xi măng trong môi trường CO_2 siêu tới hạn

Study on the carbonation of cement mortar in supercritical CO_2

> TS NGUYỄN ĐĂNG HANH
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: hanhnd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong công nghệ lưu trữ carbon dưới lòng đất, CO_2 ở trạng thái siêu tới hạn (CO_2 SC) sẽ có sự tiếp xúc với vật liệu gốc xi măng. Mục tiêu của bài báo là nghiên cứu sự carbonat hóa của vữa xi măng sau quá trình tiếp xúc với CO_2 SC theo áp suất và thời gian. Quá trình carbonat hóa được tăng tốc mạnh mẽ dưới tác động của CO_2 SC so với carbonat hóa trong điều kiện tự nhiên. Sự carbonat hóa ở bề mặt diễn ra rất nhanh, nhưng sự carbonat hóa ở chiều sâu bên trong vẫn ở mức thấp vì canxi cacbonat kết tủa ở bề mặt đóng vai trò như một màng khoáng hạn chế sự vận chuyển của CO_2 SC vào bên trong. Áp suất ảnh hưởng nhẹ đến mức độ carbonat hóa. Trong khoảng áp suất từ 80 bar đến 300 bar, việc tăng áp suất sẽ làm tăng lượng canxi cacbonat kết tủa. Ảnh hưởng của thời gian xử lý là tích cực, tăng thời gian xử lý dẫn đến tăng mức độ carbonat hóa.

Từ khóa: CO_2 siêu tới hạn; carbonat hóa; vữa; áp suất.

ABSTRACT

In carbon capture and storage technology, supercritical CO_2 reacts with the cement-based material. The objective of this study was to study the carbonation of mortars subjected to treatment with supercritical carbon dioxide (CO_2 SC), as a function of the pressure and the duration of treatment. Carbonation is greatly accelerated under the effect of CO_2 SC compared to atmospheric carbonation. If carbonation at the surface is strongly accelerated, carbonation at depth remains low because the calcium carbonate precipitated at the surface behaves like a mineral wall limiting the transfer of CO_2 SC. Pressure slightly influences the degree of carbonation. In the pressure range of 80 bar to 300 bar, an increase in pressure will increase the amount of precipitated calcium carbonate. The influence of treatment duration is positive, an increase in processing time increases the carbonation degree.

Keywords: CO_2 supercritical; carbonation; mortar; pressure.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự gia tăng nồng độ khí nhà kính trong khí quyển do hoạt động của con người, trong đó quan trọng nhất là carbon dioxide - CO_2 gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu có thể cảm nhận rõ rệt hiện nay. Việc ổn định hàm lượng CO_2 trong khí quyển là một cấp thiết để đảm bảo các yêu cầu về an toàn dài hạn và bảo vệ môi trường [1, 2]. Theo đó, hiện nay khí CO_2 có thể được thu giữ và lưu trữ ở độ sâu khoảng 800 -1.200 m đến 5.500 m với áp suất cao và nhiệt độ cao trong các vị trí lưu trữ tiềm năng dưới lòng đất (các mỏ dầu đã cạn kiệt hay các túi nước mặn, sâu hay các vỉa than mỏng, sâu không thể khai thác) hoặc trong các container/ bể chứa bằng vật liệu bê tông xi măng để lưu giữ lâu dài tại đó. Trong trường hợp đó thì CO_2 sẽ ở ở trạng thái tới hạn [3] và sẽ có sự tiếp xúc trực tiếp với vật liệu gốc xi măng (ở thành vách của bể chứa hoặc phần nắp của bể chứa), có thể luồn lách vào trong kết cấu rỗng và phản ứng với các sản phẩm thủy hóa của xi măng và tạo nên calcite $CaCO_3$. Phản ứng carbonat hóa này thay đổi vi cấu trúc vật liệu xi măng, ảnh hưởng đến cường độ cơ học và tính chất truyền dẫn của vật liệu xi măng.

Carbon dioxide CO_2 là chất khí ở điều kiện thông thường về nhiệt độ và áp suất. Đây là chất khí không màu, không mùi, không cháy, ít hoạt động hóa học và chỉ gây độc ở nồng độ cao. Tuy nhiên, CO_2 có thể tồn tại ở các trạng thái: khí, rắn, lỏng và siêu tới hạn (Bảng 1) [3].

Bảng 1. Tính chất vật lý của CO_2 ở các pha khác nhau

Trạng thái	Khối lượng riêng ($kg.m^{-3}$)	Độ nhớt (Pa.s)	Độ khuếch tán D_{11} ($m^2.s^{-1}$)
Khí (105 Pa, 288-303K)	0,6-2	$(1\text{-}3).10^{-5}$	(0,1-0,4).10-4
Siêu tới hạn (Tc, Pc) (Tc, 4 Pc)	200-500 400-900	$(1\text{-}3).10^{-5}$ $(3\text{-}9).10^{-5}$	$0,7.10^{-7}$ $0,1.10^{-7}$
Lỏng (105 Pa, 288-303K)	600-1600	$(0,2\text{-}3).10^{-3}$	$(0,2\text{-}2).10^{-9}$

CO_2 siêu tới hạn là chất lỏng siêu tới hạn phổ biến và được nghiên cứu nhiều nhất. Sự phổ biến của carbon dioxide siêu tới hạn bắt nguồn chủ yếu là carbon dioxide có các thông số tới hạn dễ đạt được nhất, với nhiệt độ tới hạn chỉ ở T_c = 31°C và áp suất tới hạn P_c = 7,38 MPa (Bảng 2) và không độc hại.

Bảng 2. Tính chất vật lý của CO_2 ở trạng thái siêu tới hạn

Nhiệt độ tới hạn (°C)	Áp suất tới hạn (MPa)	Khối lượng riêng ($kg.m^{-3}$)	Khả năng phân cực α (cm^3)	Lưỡng cực (D)
31,06	7,382	464	$27,6.10^{-25}$	0

Việc bơm CO_2 vào các bể chứa (có các cấu phần làm từ vật liệu gốc xi măng) dưới lòng đất ở độ sâu trên 800 m để lưu trữ CO_2 thì CO_2 sẽ tồn tại ở trạng thái siêu tới hạn. Mục tiêu của nghiên cứu thí nghiệm này là xác định tính chất của vật liệu vữa xi măng khi tiếp xúc với môi trường có chứa CO_2 SC, phụ thuộc vào áp suất cũng như thời gian tiếp xúc.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

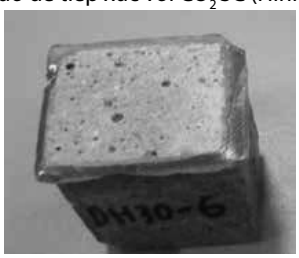
2.1. Vật liệu sử dụng

Loại xi măng được sử dụng để chế tạo các mẫu thí nghiệm là xi măng Portland loại CEM 52.5 N, có thành phần clinker chiếm tối thiểu 95%. Cát tiêu chuẩn được sử dụng là loại cát đáp ứng tiêu chuẩn NF P 18-545, có khối lượng riêng là 2.660 kg/m^3 và hệ số hấp thụ nước là 0,30%. Nước sử dụng để chế tạo vữa là nước sinh hoạt.

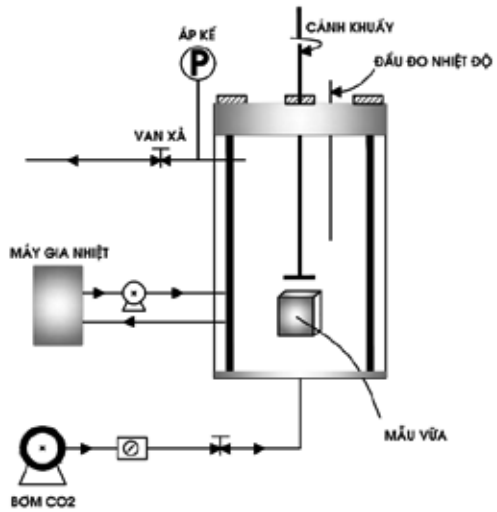
2.2. Chuẩn bị mẫu vữa

Về thành phần vữa, tỉ lệ khối lượng giữa cát tiêu chuẩn và xi măng bằng 3. Tỷ lệ khối lượng giữa nước và xi măng bằng 0,4. Cường độ nén ở tuổi 90 ngày bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn về độ ẩm và nhiệt độ đạt đến 76,9 MPa.

Vữa được trộn và đổ vào các khuôn đúc hình lăng trụ kích thước (4×4×16)cm và dưỡng ẩm. Tiếp theo, các mẫu lăng trụ (4×4×16)cm được cắt để tạo thành các khối lập phương kích thước (4×4×4)cm. Sau đó, các khối lập phương được bảo quản trong bình hút ẩm chứa dung dịch muối bão hòa Amoni Nitrat (NH_4NO_3) nhằm phân phối đều lại lượng nước trong lòng mẫu vật và điều chỉnh độ ẩm tương đối của mẫu về mức HR 65% [4]. Khi khối lượng của mẫu vữa đã trở nên ổn định, các mẫu được phủ một lớp nhựa epoxy trên 5 mặt và giữ lại một mặt tự do để tiếp xúc với CO_2 SC (Hình 1).



Hình 1. Mẫu lập phương được phủ nhựa epoxy



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm xử lý trong môi trường CO_2 SC

2.3. Xử lý vữa bằng CO_2 siêu tới hạn

Trong nghiên cứu này, carbon dioxide lỏng được cung cấp bởi công ty Air Liquide. Mẫu thử sau khi được phủ nhựa và điều chỉnh độ ẩm được đưa vào một buồng kín kim loại và sơ đồ quy trình xử lý được trình bày trong Hình 2. Ảnh hưởng của thời gian và áp suất của môi trường CO_2 SC trong buồng kim loại được nghiên cứu. Nhiệt độ xử lý được giữ cố định ở mức 90°C (Bảng 3).

Bảng 3. Điều kiện xử lý vữa bằng CO_2 SC

STT	Tên mẫu	Nhiệt độ (°C)	Áp suất (bar)	Thời gian xử lý (giờ)
1	Mẫu đối chứng	-	-	-
2	80/90/24	90	80	24
3	80/90/4	90	80	4
4	80/90/1	90	80	1
5	150/90/1	90	150	1
6	250/90/1	90	250	1
7	300/90/1	90	300	1

Sau quá trình tiếp xúc trong CO_2 SC, các mẫu thử được mài tách theo từng lớp 1 mm bằng máy mài chuyên dụng có đầu mài tròn mạ kim cương để thu bột mịn. Các mẫu bột này sau đó được thực hiện thử nghiệm phân tích trọng lượng nhiệt (ATG-DSC), phân tích đẳng nhiệt hấp phụ/khử hấp phụ theo phương pháp BET/BJH sử dụng khí nitơ nhằm phân tích phân bố kích thước lỗ rỗng của vật liệu và quan sát dưới kính hiển vi điện tử quét (MEB) và thực hiện thí nghiệm nén cơ học. Mục tiêu của các phân tích này là nhằm xác định mức độ cacbonat hóa từ bề mặt vào đến lõi mẫu của các mẫu thử khác nhau sau khi chịu các điều kiện xử lý khác nhau.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

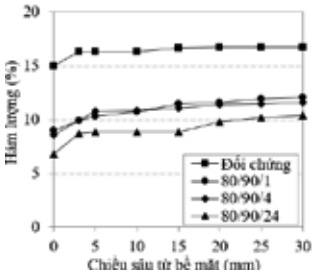
Sự biến thiên hàm lượng silicat canxi hydrat (C-S-H), Portlandite ($Ca(OH)_2$) và calcite ($CaCO_3$) theo chiều sâu tính từ bề mặt tự do được trình bày trong các Hình 3-7. Đây là các kết quả thu được từ việc phân tích trọng lượng nhiệt (ATG-DSC). Các phương trình từ 1 đến 4 mô tả quá trình carbonat hóa [4]. Có thể rút ra các nhận xét sau:

- Việc tăng thời gian xử lý không gây ra sự gia tăng đáng kể mức độ carbonat hóa. Mức độ carbonat hóa không tỷ lệ thuận với thời gian xử lý.

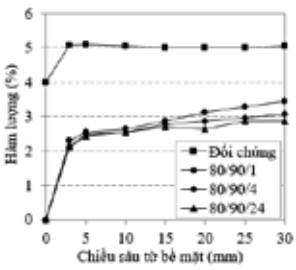
- Hàm lượng $Ca(OH)_2$ của các mẫu thử không có sự khác biệt: Portlandite rất dễ hòa tan và nhạy cảm ngay từ điều kiện bình thường [5]. Nó phản ứng rất nhanh với CO_2 SC siêu tới hạn ngay tại thời điểm tiếp xúc ban đầu. Sau đó, nó bị bao phủ bởi lớp calcite mới hình thành và có thể không thể tiếp tục hòa tan thêm được nữa. Do đó, việc tăng thời gian xử lý không làm thay đổi nhiều hàm lượng Portlandite.

- Việc tăng thời gian xử lý tạo điều kiện thuận lợi cho việc tiêu thụ các pha C-S-H. Các C-S-H tồn tại dưới dạng các lá xếp chồng lên nhau và sở hữu diện tích bề mặt riêng rất lớn, giúp đảm bảo nguồn cung cấp tác nhân phản ứng liên tục và dồi dào cho quá trình carbonat hóa. Khi thời gian xử lý tăng lên, CO_2 SC thâm nhập sâu hơn vào bên trong cấu trúc của các pha C-S-H, từ đó làm xuất hiện thêm các vị trí kết nhân mới cho các tinh thể canxi cacbonat và dẫn đến việc tiêu thụ các pha C-S-H này.

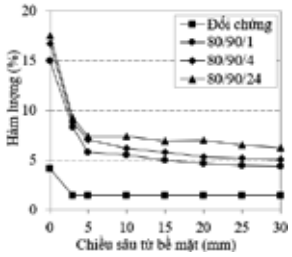
$CaO.SiO_2 + (3-x)CO_2 + yH_2O = xCaO.SiO_2.yH_2O + (3-x)CaCO_3$	*Equa. 1*
$xCaO.SiO_2.yH_2O + xCO_2 = SiO_2.yH_2O + xCaCO_3$	*Equa. 2*
$3CaO.SiO_2 + 3CO_2 + yH_2O = SiO_2.yH_2O + 3CaCO_3$	*Equa. 3*
$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O = CaCO_3 + 2H_2O$	*Equa. 4*



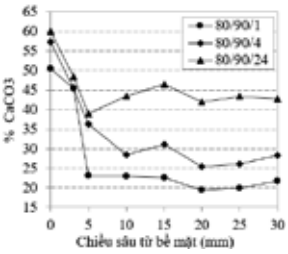
Hình 3. Biến thiên hàm lượng C-S-H theo thời gian xử lý



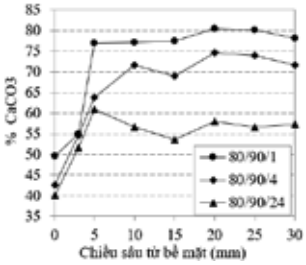
Hình 4. Biến thiên hàm lượng Ca(OH)2 theo thời gian xử lý



Hình 5. Biến thiên hàm lượng CaCO3 theo thời gian xử lý



Hình 6. Tỷ lệ phần trăm $CaCO_3$ sinh ra từ quá trình carbonat hóa C-S-H



Hình 7. Tỷ lệ $CaCO_3$ từ quá trình carbonat hóa $Ca(OH)_2$

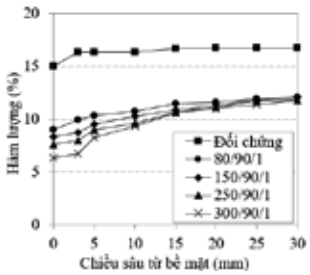
3.2. Ảnh hưởng của áp suất CO_2 SC

Khi thay đổi áp suất, sự biến thiên hàm lượng silicate canxi hydrat (C-S-H), Portlandite $Ca(OH)_2$ và calcite $CaCO_3$ theo chiều sâu được trình bày trong các Hình 8-10. Có thể rút ra các nhận xét sau:

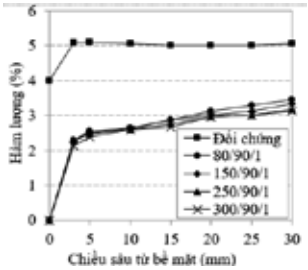
- CO_2 SC tấn công mạnh mẽ vào cấu trúc vật liệu xi măng tại khu vực gần bề mặt của mẫu thử. Sự khác biệt về mức độ carbonat hóa chủ yếu xảy ra ở khu vực gần bề mặt.

- Việc tăng áp suất dẫn đến sự gia tăng mức độ carbonat hóa, nhưng sự gia tăng này không đáng kể. Hàm lượng $Ca(OH)_2$ của các mẫu thử gần như giống nhau. Hàm lượng C-S-H giảm dần khi tăng áp suất.

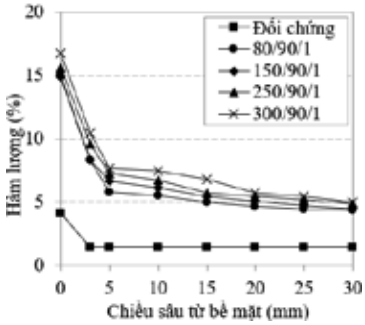
- Một mặt, khi áp suất tăng lên, khả năng tạo ra các vị trí phản ứng mới bên trong cấu trúc của các pha C-S-H sẽ phát triển, từ đó thúc đẩy quá trình carbonat hóa. Mặt khác, khi áp suất tăng, hệ số khuếch tán của CO_2 SC bị giảm đi, dẫn đến khả năng thâm nhập nhanh của CO_2 SC bị hạn chế, do đó làm giảm quá trình carbonat hóa. Hai tác động này bù trừ và triệt tiêu lẫn nhau, dẫn đến kết quả cuối cùng là sự biến thiên của mức độ carbonat hóa khi tăng áp suất là không đáng kể.



Hình 8. Biến thiên khối lượng C-S-H theo áp suất xử lý



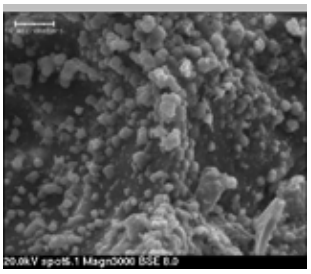
Hình 9. Biến thiên khối lượng Ca(OH)2 theo áp suất xử lý



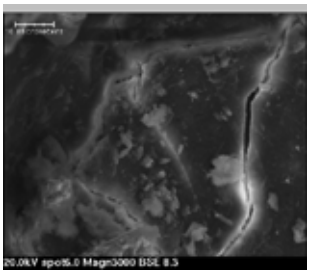
Hình 10. Biến thiên khối lượng CaCO3 theo áp suất xử lý

3.3. Quan sát qua MEB

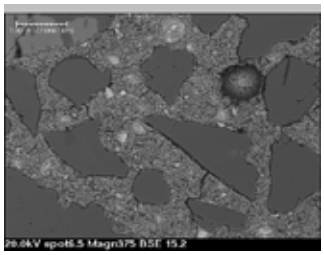
Vi cấu trúc của vữa xi măng được quan sát dưới kính hiển vi MEB để đánh giá những thay đổi cấu trúc sau khi trải qua quá trình xử lý trong môi trường CO_2 SC (Hình 11). Quá trình carbonat hóa dẫn đến sự không đồng nhất trong vi cấu trúc của các vật liệu. Nó làm xuất hiện các lỗ rỗng mới và các vết nứt mới bên trong ma trận xi măng. Các vết nứt nhỏ luôn hiện diện trong những mẫu thử đã được xử lý bằng CO_2 SC. Mức độ nứt giảm dần theo chiều sâu của mẫu thử. Các bề mặt tự do tiếp xúc trực tiếp với CO_2 SC bị nứt vỡ mạnh mẽ do sự giãn nở đi kèm với quá trình hình thành tinh thể calcite.



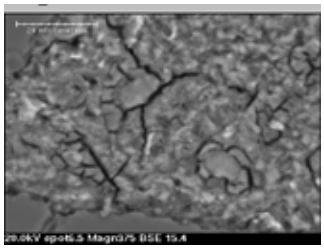
Mẫu đối chứng - tại bề mặt



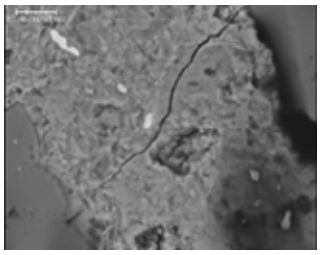
Mẫu đối chứng - trong một lỗ rỗng



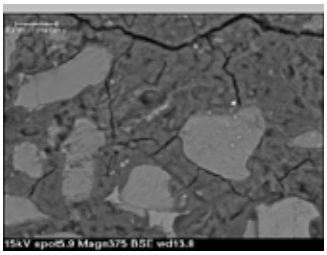
Mẫu xử lý ở 150bar/90°C/1h - trên bề mặt - độ phóng đại 375



Mẫu xử lý ở 150bar/90°C/1h - trên bề mặt - độ phóng đại 3.000



Mẫu xử lý ở 150bar/90°C/1h - ở độ sâu 3 mm từ bề mặt - độ phóng đại 375



Mẫu xử lý ở 150bar/90°C/1h - ở độ sâu 5 mm từ bề mặt - độ phóng đại 375

Hình 11. Hình ảnh MEB của các mẫu vữa theo các điều kiện xử lý khác nhau

3.4. Đẳng nhiệt hấp phụ/khử hấp phụ nitơ BET/BJH

Tổng thể tích lỗ rỗng tích lũy và kích thước lỗ rỗng được trình bày trong Bảng 4. Tổng thể tích lỗ rỗng của các mẫu thử đều tăng lên. Trên thực tế, sự bồi lấp $CaCO_3$ trên thành các lỗ rỗng lớn trong quá trình carbonat hóa dẫn đến sự gia tăng các lỗ rỗng nhỏ trong phạm vi đo của kỹ thuật BJH.

Sự biến thiên tổng thể tích lỗ rỗng khá giống nhau giữa các mẫu được xử lý ở những điều kiện khác nhau. Mẫu xử lý ở áp suất 300 bar cho thấy sự biến thiên thể tích lỗ rỗng tích lũy lớn nhất vì trong trường hợp này, quá trình carbonat hóa diễn ra mạnh mẽ nhất.

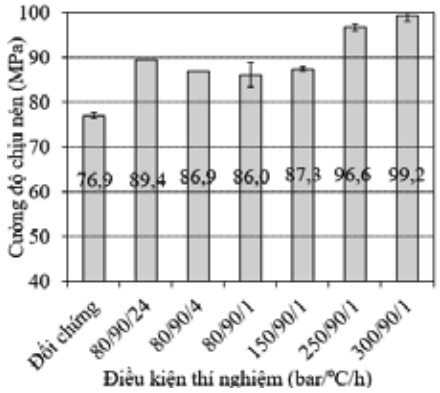
Kích thước lỗ rỗng trung bình tăng lên. Thực tế, quá trình carbonat hóa liên quan đến sự chuyển đổi $Ca(OH)_2$ từ các lỗ rỗng vi mô sang các lỗ rỗng lớn (nằm ngoài phạm vi đo của kỹ thuật BJH) thông qua sự hòa tan hoặc dịch chuyển của quá trình chuyển đổi sang lỗ rỗng vi mô diễn ra mạnh mẽ hơn so với sự lắng đọng của các tinh thể mịn $Ca(OH)_2$ và dẫn đến kích thước lỗ rỗng trung bình tăng lên.

Bảng 4. Kích thước lỗ rỗng trung bình và thể tích lỗ rỗng tích lũy

Lớp vữa	Thông số	Mẫu đối chứng	Mẫu được xử lý ở điều kiện			
			80/90/1	150/90/1	250/90/1	300/90/1
Tại bề mặt	Thể tích tích lũy (cm^3/g)	0,0100	0,0119	0,0107	0,0117	0,0122
	Kích thước trung bình (Å)	63,187	63,195	70,209	71,667	71,672
Cách bề mặt 3mm	Thể tích tích lũy (cm^3/g)	0,0091	0,0111	0,0117	0,0118	0,0118
	Kích thước trung bình (Å)	68,066	63,081	84,897	66,755	73,682

3.5. Cường độ cơ học

Cường độ chịu nén của vữa xi măng sau khi xử lý trong môi trường CO_2 SC tăng lên đáng kể, dao động từ 85,9 đến 99,2 MPa, tương ứng với mức tăng từ 11,8% đến 29,0% (Hình 12). Cường độ chịu nén của vữa bê tông có liên quan mật thiết đến cấu trúc rỗng của vật liệu, khi mà hệ thống các lỗ rỗng được bồi đắp và lượng lỗ rỗng giảm đi thì cường độ cơ học tăng lên. Kết quả này cũng phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đó đã được công bố [6].



Hình 12. Cường độ chịu nén của mẫu vữa ở các điều kiện thí nghiệm khác nhau

4. KẾT LUẬN

Việc thu giữ và lưu trữ CO_2 mang lại tiềm năng to lớn trong việc giảm phát thải carbon. CO_2 được lưu giữ trong các bể chứa bằng bê tông đặt sâu dưới các tầng địa chất và trạng thái siêu tới hạn. Nội dung của nghiên cứu này nhằm làm rõ mối quan hệ giữa các thông số thực nghiệm của quá trình xử lý bằng CO_2 SC siêu tới hạn (áp suất, thời gian xử lý).

Với CO_2 SC, quá trình carbonat hóa các vật liệu gốc xi măng diễn ra nhanh hơn nhiều so với carbonat hóa trong điều kiện tự nhiên. Sau quá trình xử lý này, vi cấu trúc lỗ rỗng bị thay đổi, đặc biệt là do sự kết tủa của các canxi cacbonat làm lấp đầy dần độ rỗng.

Nếu quá trình carbonat hóa ở bề mặt được đẩy nhanh mạnh mẽ, thì sự carbonat hóa ở chiều sâu bên trong vẫn còn thấp. Áp suất có ảnh hưởng nhẹ đến hiện tượng carbonat hóa. Trong khoảng áp suất từ 80 bar đến 300 bar, việc tăng áp suất sẽ làm tăng lượng canxi cacbonat kết tủa. Quá trình carbonat hóa hoàn toàn các pha đã không xảy ra.

Trong môi trường CO_2 SC thì sau quá trình carbonat hóa, cường độ chịu nén của vật liệu vữa được tăng lên đáng kể. Điều này cũng mở ra một cách thức mới để cải thiện cường độ cơ học các vật liệu gốc xi măng (vữa, bê tông).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] KK Aligizaki. Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, interpretation and requirements. CRC Press, 432 p, 2005, doi: 10.1201/9781482271959.

[2] C Hepburn, E Adlen, J Beddington et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. Nature, no. 575, pp. 87-97, 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1681-6.

[3] O Regnault. Étude de la réactivité de minéraux purs en présence de CO_2 supercritique - Mesure de la cinétique de carbonatation de la portlandite. Thèse de doctorat à l'Ecole de Mines de Paris, 160 p, 2008.

[4] M Thiery. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires - Prise en compte des effets cinétiques et des modification microstructurales et hydriques. Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 331 p, 2005.

[5] S Park, H Moon, JH Kim, M Lee, CW Chung. Reaction of hydrated cement paste with supercritical carbon dioxide. Construction and Building Materials, no. 281, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122615.

[6] R Andersson, H Stripple, T Gustafsson, C Ljungkrantz. C. Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material. Cement and Concrete Research, no. 124, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105819.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 15/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Phân tích ứng xử móng nông bằng phần tử hữu hạn 3D trong các điều kiện địa chất khác nhau

Three-dimensional finite element ananlysis of shallow foundation behavior under different geological conditions

> TS VÕ NGUYỄN PHÚ HUÂN
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh
Email: huan.vnp@ou.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu về ứng xử của các loại móng nông trên nền đất cát và đất sét thông qua phương pháp mô hình hóa phần tử hữu hạn (FEM) ba chiều. Kết quả cho thấy các yếu tố chi phối khả năng làm việc của móng là độ cứng và điều kiện thoát nước của lớp đất ngay bên dưới móng. Nền cát thể hiện việc ứng xử thoát nước và giãn nở, tương ứng với độ lún nhỏ, ứng suất bên dưới đáy móng nhỏ và sự phân bố ứng suất chính hầu như là tuyến tính đối với các dạng móng nông. Trong khi đó, ở lớp đất sét cho thấy vùng lún phát triển lớn hơn cùng với đó mô men phát sinh trong các dầm liên kết móng tăng cao. Nguyên nhân là do khả năng thoát nước kém dẫn đến áp lực nước lỗ rỗng phát sinh. Trong số các dạng móng nông được nghiên cứu, móng bè cho kết quả tối ưu nhất về phân bố ứng suất và khả năng kiểm soát lún lệch trên cả hai loại địa chất. Móng đơn là loại nhạy cảm nhất với điều kiện đất nền, với độ lún trên đất sét lớn gấp nhiều lần so với trên đất cát. Tổng thể, nghiên cứu làm rõ tính tương hỗ giữa loại đất và hình học móng, đồng thời đưa ra các khuyến nghị: đối với đất dính mềm, nên sử dụng móng bè để giảm nguy cơ lún quá mức; còn đối với đất cát chặt, nơi khả năng phân tán ứng suất và kiểm soát biến dạng hiệu quả hơn, móng đơn và móng kết hợp là những lựa chọn đáng tin cậy.

Từ khóa: Móng nông; độ lún; phần tử hữu hạn; Plaxis 3D; ứng suất dưới đáy móng.

ABSTRACT

The paper investigates the behavior of shallow foundations on sandy and clayey soils using a three - dimensional finite element modeling (3D FEM) approach. The main findings indicate that the dominant factors governing foundation performance are the stiffness and drainage conditions of the soil layer directly beneath the footing. Sandy soil exhibits drained and dilative behavior, corresponding to small settlements, lower stresses beneath the footing base, and an almost linear distribution of principal stresses for the different shallow foundation types. In contrast, the clay layer shows a larger settlement zone, accompanied by increased bending moments in the beams connecting the footings. This is mainly due to poor drainage conditions, which lead to the development of excess pore water pressure. Among the shallow foundation types investigated, the raft foundation produced the most optimal results in terms of stress distribution and differential settlement control across both soil conditions. Isolated footings were found to be the most sensitive to subsoil conditions, with settlements on clay being several times greater than those on sand. Overall, the study highlights the synergistic interaction between soil type and foundation geometry and provides the following recommendations: for soft cohesive soils, raft foundations should be adopted to reduce the risk of excessive settlement; for dense sandy soils, where stress dispersion and deformation control are more effective, isolated and combined footings are reliable solutions.

Keyword: Shallow foundation; settlement; finite element method; Plaxis 3D; stress beneath the footing base.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự đoán chính xác độ lún dưới móng nông là một trong những tiêu chí quan trọng trong thiết kế kết cấu, vì liên quan đến các điều kiện khá phức tạp như trạng thái giới hạn sử dụng, sự đa dạng về các loại địa chất bên dưới móng, yêu cầu về độ lún dưới sự thay đổi thường xuyên của tải trọng khai thác [1], [2]. Trong khi các phương pháp thiết kế truyền thống dựa vào các tương quan bán thực nghiệm và thực nghiệm đàn hồi đơn giản, nhu cầu ngày càng tăng đối với thiết kế dựa trên hiệu năng và kiểm soát biến dạng đã thúc đẩy sự chuyển dịch sang các phân tích số tiên tiến có khả năng mô phỏng ứng xử phi tuyến, phụ thuộc vào ứng suất và biến dạng của đất dưới các đường tải thực tế [3]. Trong bối cảnh này, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), đặc biệt là các nền tảng chuyên dụng cho địa kỹ thuật như phần mềm Plaxis, đã trở thành công cụ được

sử dụng rộng rãi để mô hình hóa quan hệ tải trọng - độ lún của móng nông trên cả đất cát và đất sét [4].

Xét về mặt cơ học, độ lún của móng nông phát sinh từ các thành phần khác nhau nhưng có tương tác lẫn nhau, trong đó mức độ ảnh hưởng phụ thuộc mạnh vào loại đất và lịch sử ứng suất. Trong đất hạt rời, độ lún thường bị chi phối bởi biến dạng đàn hồi và dẻo tức thời (ngắn hạn) trong điều kiện thoát nước; cố kết theo nghĩa cổ điển thường chỉ đáng kể trong các trường hợp đặc biệt như cát bán bão hòa, cát pha bụi, hoặc khi hiện tượng từ biến trở nên quan trọng trong thời gian dài [5]. Ứng xử tải trọng - độ lún của cát chủ yếu được quyết định bởi độ cứng phi tuyến phụ thuộc ứng suất và sự phát triển của các vùng cắt dẻo dưới đáy móng, vốn chịu chi phối bởi góc ma sát trong, độ chặt (hoặc tham số trạng thái) và khi có xét đến tính giãn nở [6], [7].

Ngoài ra, sự gia tăng độ ẩm của đất sét (thường do mực nước ngầm dâng cao) có thể làm tăng đáng kể độ lún móng. Ttareq H. Al-Rahal và cộng sự đã thực hiện phân tích số bằng GeoStudio và báo cáo rằng độ lún dưới móng băng tại Bashtapia Castle tăng từ 24 mm lên 69 mm khi mực nước ngầm dâng từ độ sâu 8 m lên 1 m dưới đáy móng. Phản ứng này được quy cho sự giảm (hoặc mất) lực hút ma trận và sự suy giảm ứng suất hữu hiệu liên quan, từ đó làm giảm sức kháng cắt và sức chịu tải tổng thể [8].

Một số nghiên cứu đã tập trung vào ảnh hưởng của cường độ và trạng thái đất sét đến sức chịu tải và độ lún. Sử dụng mô hình Soft Soil trong Plaxis, Baraa Al-Dawoodi và cộng sự đã mô phỏng quan hệ tải trọng - độ lún của móng nông trên ba loại đất sét có lực dính khác nhau (c = 16, 25, 70 kPa), được hiệu chỉnh theo thí nghiệm. Kết quả cho thấy loại sét mềm nhất (c = 16 kPa) cho sự phù hợp tốt nhất giữa mô phỏng và thí nghiệm, nhấn mạnh tính nhạy cảm của đường cong tải trọng - độ lún đối với các tham số cường độ và tính nén, cũng như sự cần thiết phải hiệu chỉnh cẩn thận theo trạng thái đất [10].

Đối với đất sét mềm và sét cố kết bình thường, mô hình Soft Soil thường được sử dụng để mô phỏng cả thành phần lún tức thời và lún cố kết theo thời gian. So sánh giữa kết quả số và thí nghiệm cho thấy mô hình Soft Soil tái hiện khá chính xác lún cố kết nhưng có thể đánh giá thấp lún tức thời nếu độ cứng ở biến dạng nhỏ không được biểu diễn hoặc hiệu chỉnh đầy đủ. Trong nghiên cứu kết hợp giữa thí nghiệm phòng và Plaxis, Waheed và Asmael báo cáo rằng mô hình Soft Soil dự đoán lún tức thời thấp hơn khoảng 30% so với thí nghiệm mô hình móng, nhưng cho sự phù hợp cao đối với lún cố kết của móng bè trên đất sét. Phân tích tham số của họ cho thấy lún cố kết lớn hơn nhiều so với lún tức thời; tỷ lệ lún tức thời/lún cố kết tăng từ khoảng 0,3% ở áp lực 20 kPa lên khoảng 1,2% ở áp lực cao hơn. Đồng thời, khi giảm chiều dày lớp sét từ ba lần bề rộng móng bè xuống còn một lần bề rộng móng, tổng độ lún tăng khoảng 66% [9]. Schneider-Muntau và Bathaeian nghiên cứu ứng xử móng trên đất sét bằng phương pháp barodesy trong cả phần mềm SPARC và phần tử hữu hạn, thay đổi mức tải phủ để mô phỏng các trạng thái từ quá cố kết đến cố kết bình thường. Kết quả cho thấy quá cố kết và lịch sử ứng suất - vốn đóng vai trò điều chỉnh cường độ và độ cứng - ảnh hưởng mạnh đến hình dạng đường cong tải trọng - độ lún và phạm vi vùng cắt, nhấn mạnh vai trò đan xen giữa cường độ, độ cứng và trạng thái đất trong việc quyết định độ lún [11].

Đối với đất cát, các nghiên cứu số phát triển theo hướng tương tự nhưng tập trung vào ứng xử thoát nước, ảnh hưởng của độ chặt/trạng thái và sự đa dạng của mô hình vật liệu. Các mô hình tiên tiến ban đầu cho móng trên đất hạt rời đã nhấn mạnh tầm quan trọng của độ cứng phụ thuộc ứng suất và cơ chế hóa bền thực tế trong dự báo độ lún [12]. Các nghiên cứu FEM và PLAXIS sau đó đã xem xét móng trên cát với các góc ma sát và độ chặt khác nhau, cũng như tương tác giữa nhiều móng và các biện pháp cải tạo nền [13]. Các nghiên cứu phần tử hữu hạn khác đã khảo sát ảnh hưởng của góc ma sát và độ chặt đến độ lún và sức chịu tải của cát. Ekbote và Nainegali sử dụng ABAQUS với mô hình Mohr-Coulomb để phân tích hai móng băng không đối xứng đặt gần nhau trong nền đất rời đồng nhất, cho thấy góc ma sát, khoảng cách giữa các móng và chiều sâu chôn móng ảnh hưởng đáng kể đến đường cong tải trọng - độ lún và hệ số tương tác lún [14]. Đối với nền đất hạt rời được cải tạo, Aarthi sử dụng PLAXIS 3D để nghiên cứu các cột đầm cát trong nền cát rời đến chặt trung bình và nhận thấy góc ma sát trong của cát trong cột, độ chặt tương đối và hình học cột đều có ảnh hưởng đáng kể đến cả sức chịu tải và đặc tính lún [15].

Thông qua các nghiên cứu trước đây, trong bài báo này tác giả đã phát triển hơn trong việc phân tích phần tử hữu hạn thông qua việc áp dụng phần mềm Plaxis 3D. Ưu điểm là có thể mô hình hóa tổng quát, chi tiết hơn sự tương hỗ của các phần tử trong không gian 3 chiều.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này phân tích phương pháp phần tử hữu hạn trong Plaxis 3D nhằm đánh giá ảnh hưởng của các đặc tính đất đến ứng xử của móng nông trên nền đất cát và đất sét. Phân tích tập trung vào độ lún thẳng đứng, sức chịu tải và các dạng biến dạng cũng như phân bố ứng suất - biến dạng liên quan. Các phân tích được thực hiện riêng biệt nhưng theo cùng một phương pháp luận cho 2 loại địa chất là: đất cát trong điều kiện thoát nước và đất sét trong điều kiện không thoát nước (ngắn hạn). Ba dạng móng nông phổ biến trong thực tế được phân tích đó là: móng đơn, móng kết hợp và móng bè. Các trường hợp cụ thể sẽ được mô hình hóa và khảo sát thông qua việc thay đổi có hệ thống các tham số cường độ và độ cứng của đất.

2.1. Phân tích hình học các loại móng

Ba dạng hình học móng được nghiên cứu gồm: móng đơn, móng kết hợp và móng bè. Các dạng này được mô phỏng trong Plaxis 3D, có áp dụng điều kiện đối xứng khi phù hợp. Riêng móng bè trong phần mềm được biểu diễn dưới dạng bản có độ cứng lớn.

Trong tất cả các trường hợp, miền đất nền được mở rộng theo phương ngang từ 4B – 6B tính từ mép móng và theo phương đứng từ 3B – 4B dưới đáy móng nhằm tránh ảnh hưởng của điều kiện biên đến kết quả tính toán. Tính đầy đủ của miền mô hình được kiểm chứng thông qua các phân tích độ nhạy.

2.2. Mô hình đất

Hai loại đất thường gặp trong thực tế được mô hình với các đặc trưng sau:

• Đất cát: được mô hình hóa là đồng nhất và trong điều kiện thoát nước, đại diện cho cát chặt vừa đến chặt. Các tham số bao gồm $c' \approx 0$, góc ma sát hữu hiệu φ', trọng lượng thể tích γ, hệ số Poisson ν và các tham số độ cứng được xác định theo mô hình vật liệu được lựa chọn.

• Đất sét: đại diện cho sét cố kết bình thường đến hơi quá cố kết. Ứng xử ngắn hạn được mô hình hóa trong điều kiện không thoát nước bằng cách sử dụng biểu thức ứng suất tổng hoặc ứng suất hữu hiệu, trong khi độ lún dài hạn được xác định thông qua phân tích thoát nước hoặc phân tích cố kết liên hợp. Các tham số bao gồm cường độ kháng cắt không thoát nước S_u, lực dính hữu hiệu c', góc ma sát hữu hiệu φ', các chỉ số nén hoặc λ^*, κ^*, hệ số thấm k.

Đất cát được mô hình hóa bằng mô hình Hardening Soil (HS) hoặc Hardening Soil Small (HSsmall) nhằm xét đến độ cứng phi

tuyến và ứng xử ở biến dạng nhỏ. Mô hình Mohr - Coulomb (MC) được sử dụng chọn lọc để so sánh.

Đất sét được mô hình hóa bằng mô hình Soft Soil (SS) để mô phỏng ứng xử cố kết và bằng HS/HSsmall để mô phỏng quan hệ ứng suất - biến dạng trong điều kiện không thoát nước. Mô hình Mohr - Coulomb theo ứng suất tổng với đầu vào S_u được sử dụng như mô hình cơ sở đơn giản. Trong tất cả các trường hợp, các tham số như c, φ, S_u, trọng lượng thể tích γ, mô đun độ cứng và hệ số K_0 được lựa chọn trong các khoảng giá trị địa kỹ thuật điển hình.

2.3. Tham số địa chất

Đối với đất cát, các tham số thay đổi gồm góc ma sát, các tham số độ cứng, mô đun ở biến dạng nhỏ và trọng lượng thể tích. Đối với đất sét, các tham số thay đổi gồm cường độ kháng cắt không thoát nước S_u, các tham số cường độ hữu hiệu, tham số nén lún, hệ số thấm (phục vụ phân tích cố kết) và trọng lượng thể tích.

Khoảng giá trị tham số được lựa chọn đại diện cho các điều kiện đất thực tế. Việc thay đổi tham số được thực hiện có hệ thống nhằm tách riêng ảnh hưởng của từng yếu tố, đồng thời vẫn đảm bảo các mối quan hệ vật lý hợp lý (ví dụ: liên hệ giữa φ' và độ cứng trong cát, hoặc giữa S_u và E_{oed} trong sét).

2.4. Quy trình gia tải

Móng được gia tải theo phương thẳng đứng bằng áp lực phân bố đều tăng dần theo từng bước hoặc theo phương pháp cưỡng bức chuyển vị. Các bước tải nhỏ được sử dụng để xác định độ cứng ban đầu, trong khi các bước tải chi tiết hơn được áp dụng gần trạng thái phá hoại.Sức chịu tải giới hạn được xác định từ đỉnh của đường cong tải trọng - độ lún hoặc theo tiêu chí độ lún quy ước khi không xuất hiện đỉnh rõ ràng. Đối với đất sét, độ lún tức thời và độ lún cố kết được tách riêng thông qua các giai đoạn phân tích không thoát nước và cố kết kết hợp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

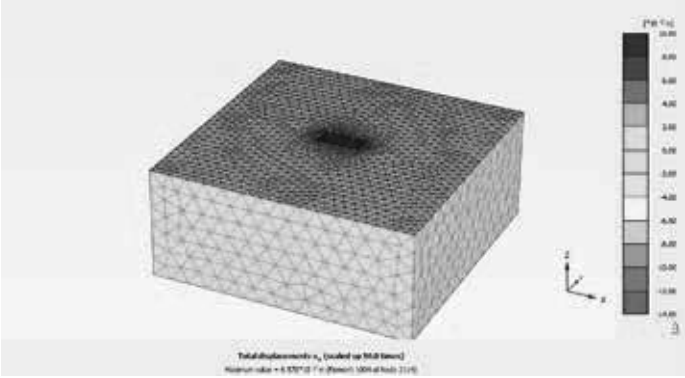
Trong phần này, các kết quả số được thu thập từ các phân tích bằng Plaxis 3D cho ba loại móng nông gồm móng đơn, móng kết hợp và móng bè, đặt trên cả nền đất cát và đất sét. Phần thảo luận tập trung vào sự thay đổi ứng xử của móng theo loại đất và dạng móng, đặc biệt nhấn mạnh đến độ lún thẳng đứng, sự phân bố ứng suất dưới đáy móng và sự hình thành các cơ chế phá hoại tiềm năng.

Đối với mỗi trường hợp tương tác giữa móng và nền đất, kết quả số được phân tích thông qua ứng suất pháp hữu hiệu, ứng suất pháp tổng, các thành phần ứng suất chính và các đường đồng mức lún thẳng đứng. Những phân tích này giúp so sánh cơ chế truyền tải trọng giữa đất cát và đất sét, làm rõ sự khác biệt trong ứng xử của chúng, đồng thời xác định phạm vi ứng suất và vùng dẻo hình thành dưới móng đơn, móng kết hợp và móng bè. Các kết quả này là cơ sở để rút ra kết luận về ứng xử của các loại móng khác nhau trên nền đất cát và đất sét.

3.1. Ứng xử tải trọng - độ lún

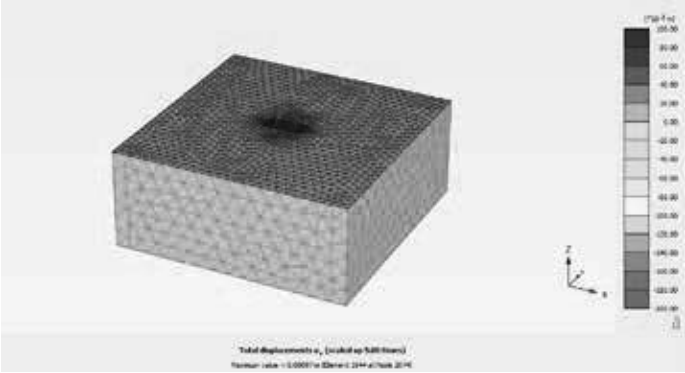
Kết quả số thu được từ mô phỏng cho thấy sự ứng xử của từng loại móng khi đặt trên nền đất cát và đất sét dưới tác dụng tải trọng. Các đường đồng mức lún, thể hiện cả giá trị chuyển vị thẳng đứng và phạm vi lan truyền biến dạng trong khối đất, cung cấp cơ sở đánh giá hiệu quả phân bố ứng suất của từng loại móng.

Ví dụ như móng kết hợp trên nền cát cho thấy giá trị độ lún rất nhỏ, khoảng 0,85 mm, thể hiện độ cứng cao và ứng xử thoát nước của lớp cát (Hình 2). Vùng lún nông và tập trung ngay bên dưới móng, các đường đồng mức nhanh chóng suy giảm theo chiều sâu. Ứng xử này cho thấy tải trọng từ móng được phân bố hiệu quả và lớp cát có khả năng kháng nén tốt. Không xuất hiện dấu hiệu biến dạng cắt sâu, điều này là đặc trưng đối với móng kết hợp đặt trên nền cát chặt.



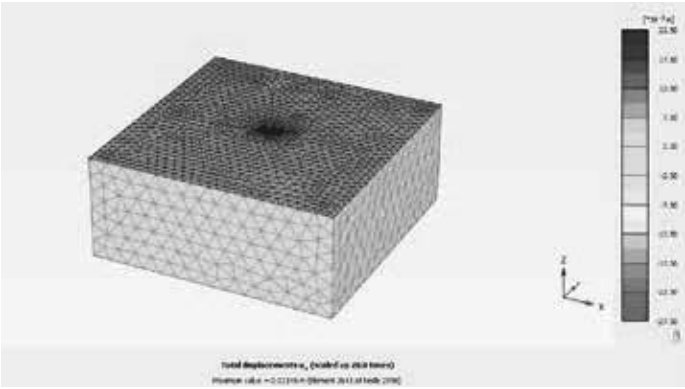
Hình 1. Độ lún của móng kết hợp trên nền đất cát (Uz = 0,85 mm)

Trong điều kiện nền đất sét, độ lún lớn nhất của móng kết hợp đạt tới 8,6 cm (Hình 3), cho thấy sự gia tăng đáng kể so với trường hợp nền cát. Một bầu lún sâu và rộng xuất hiện rõ ràng trong lớp đất sét, trái ngược với trường hợp nền cát. Dạng hình học đặc trưng của biểu đồ lún này phản ánh độ cứng thấp và tính nén lún cao của đất sét. Hình dạng bầu lún và sự biến dạng của đất cũng cho thấy xu hướng xuất hiện biến dạng cắt cục bộ ngay dưới đáy móng, khác với trường hợp nền cát. Ứng xử của móng kết hợp vì vậy rất nhạy cảm với loại đất nền, đặc biệt khi tồn tại lớp sét không thoát nước.



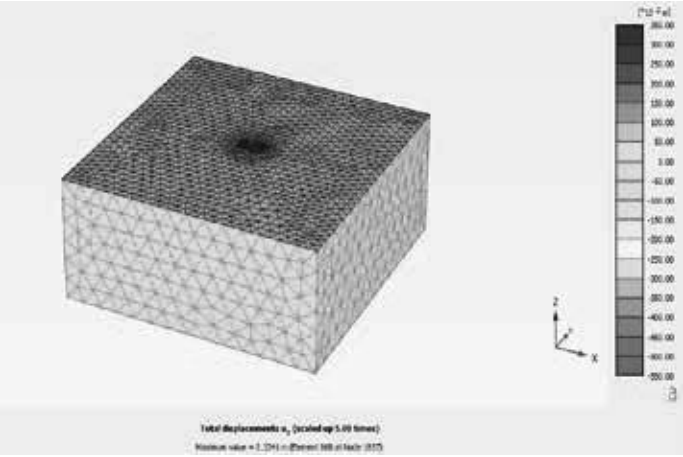
Hình 2. Độ lún của móng kết hợp trên nền đất sét (Uz = 8,6 cm)

Đối với móng đơn trên nền cát, độ lún lớn hơn, khoảng 2,1 cm. Giá trị này là hợp lý do móng đơn có diện tích tiếp xúc nhỏ hơn so với móng kết hợp hoặc móng bè. Như thể hiện ở Hình 4, bầu lún vẫn tương đối nông, cho thấy đất cát vẫn có khả năng kháng đỡ theo phương ngang tốt; tuy nhiên, chuyển vị thẳng đứng lớn hơn do tải trọng tập trung trên diện tích nhỏ hơn. Điều này minh họa sự nhạy cảm cao hơn của móng đơn đối với cường độ ứng suất trong nền đất hạt rời nông.



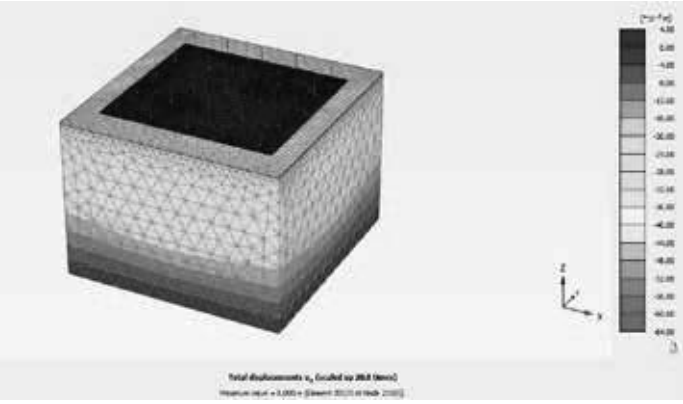
Hình 3. Độ lún của móng đơn trên nền đất cát (Uz = 2,1 cm)

Móng đơn trên nền đất sét cho giá trị lún lớn nhất, lên tới 32 cm, đây là giá trị lớn nhất trong tất cả các trường hợp nghiên cứu. Độ lún rất lớn này phản ánh sự chuyển vị xuống đáng kể, cho thấy đất sét mềm không đủ khả năng chịu tải tập trung mà không xảy ra lún quá mức. Như thể hiện ở Hình 5, các đường đồng mức lún lan sâu vào lớp sét, hình thành một bầu biến dạng rõ rệt; đặc trưng của điều kiện cắt không thoát nước. So với trường hợp cùng loại móng trên nền cát (2,1 cm), sự khác biệt này cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của độ cứng đất đến khả năng làm việc của móng.



Hình 4. Độ lún của móng đơn trên nền đất sét (Uz = 32 cm)

Đối với nền cát, móng bè cho độ lún rất nhỏ, chỉ khoảng 0,4 cm. Như thể hiện ở Hình 6, phân bố lún tương đối đều do diện tích tiếp xúc lớn của móng bè giúp phân tán tải trọng trên phạm vi rộng hơn. Độ cứng cao của cát là nguyên nhân chính khiến chuyển vị bị hạn chế, và biến dạng chỉ tập trung ở lớp đất phía trên. Sự đồng đều của phân bố lún cho thấy móng bè có hiệu quả cao trong việc giảm tập trung ứng suất trên nền đất hạt rời.



Hình 5. Độ lún của móng bè trên nền đất cát (Uz = 0,4 cm)

Hình 7 thể hiện móng bè trên nền đất sét, cho thấy độ lún vẫn tương đối lớn (1,6 cm), tuy nhiên phân bố biến dạng đều hơn trên toàn bộ diện tích móng. Khác với móng đơn và móng kết hợp, móng bè tiếp xúc toàn phần với nền đất, giúp phân bố tải trọng và giảm tập trung ứng suất. Mặc dù đất sét vẫn có chuyển vị thẳng đứng đáng kể, bầu lún phẳng hơn và phân bố đồng đều dưới toàn bộ móng bè. Điều này phản ánh khả năng của móng bè trong việc phân tán áp lực lên thể tích đất sét rộng hơn, làm chậm quá trình phá hoại cắt và nâng cao hiệu quả làm việc dưới tải trọng sử dụng, dù nền đất khá mềm.

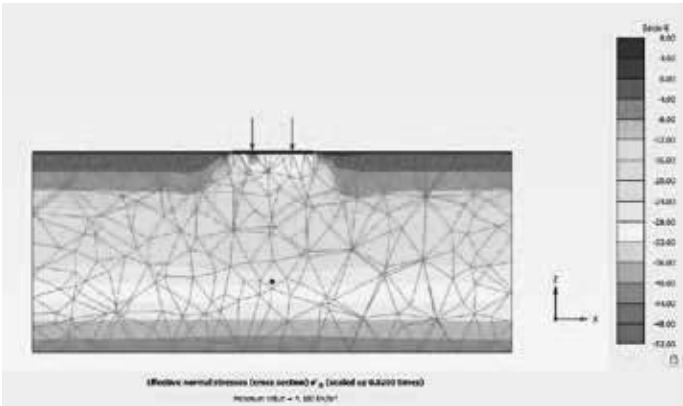
Hình 6. Độ lún của móng bè trên nền đất sét (Uz = 1,6 cm)

Kết quả cho thấy rõ ràng rằng độ cứng của đất và diện tích móng là hai yếu tố chi phối chính đến giá trị độ lún. Đất cát cung cấp khả năng đỡ tốt nhờ ứng xử thoát nước và giãn nở, trong khi đất sét thể hiện biến dạng lớn, đặc biệt dưới tải trọng tập trung.

3.2. Phân bố ứng suất pháp hữu hiệu

Các đường đồng mức ứng suất pháp hữu hiệu cho thấy cách mỗi loại móng huy động đất xung quanh và cách tải trọng được truyền theo phương thẳng đứng xuống nền đất. So sánh các trường hợp cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa nền cát và nền sét, cũng như giữa móng đơn, móng kết hợp và móng bè. Giá trị σ' lớn nhất đo được ngay dưới đáy mỗi móng phản ánh các đặc trưng quan trọng như độ cứng của đất, mức độ tải trọng tác dụng, cơ chế tiêu tán tải và chiều sâu ảnh hưởng.

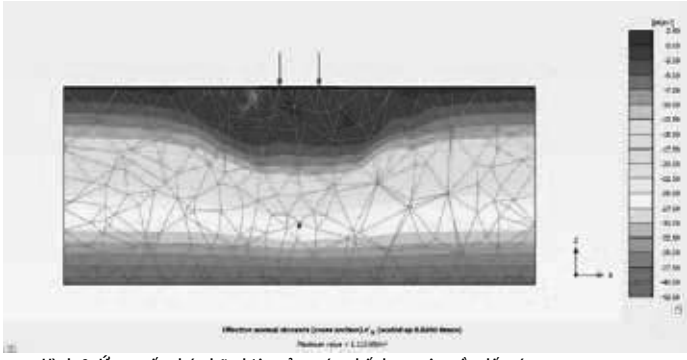
Móng kết hợp trên nền cát tạo ra ứng suất pháp hữu hiệu tương đối cao, đạt 4,10 kN/m², tập trung ngay dưới vùng chịu tải. Bầu ứng suất thể hiện trong Hình 8 khá rõ rệt và tương đối nông trong mặt cắt đất. Các đường đồng mức lan rộng nhưng giảm nhanh theo chiều sâu, thể hiện đặc trưng ứng xử thoát nước của cát chặt. Phân bố ứng suất tổng thể cho thấy lớp cát có khả năng truyền tải hiệu quả nhờ cơ chế ma sát và giãn nở, với mức độ lan truyền ứng suất xuống sâu không đáng kể.



Hình 7. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng kết hợp trên nền đất cát

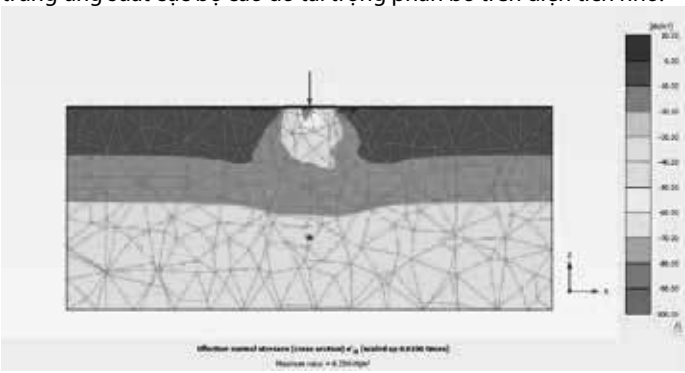
Khi cùng loại móng này được đặt trên nền sét, giá trị ứng suất hữu hiệu lớn nhất giảm đáng kể xuống còn 1,115 kN/m² như thể hiện ở Hình 9. Sự suy giảm này xuất phát từ việc đất sét trong điều kiện không thoát nước sinh ra áp lực nước lỗ rỗng dư, làm giảm ứng suất hữu hiệu. Các đường đồng mức ứng suất

lan sâu hơn và tạo thành bầu ứng suất rộng hơn so với trường hợp nền cát, cho thấy đất sét mềm hơn và có xu hướng phân tán tải trọng trên phạm vi rộng hơn. Giá trị σ'max thấp phản ánh cường độ kháng cắt thấp của đất sét trong giai đoạn đầu chịu tải.



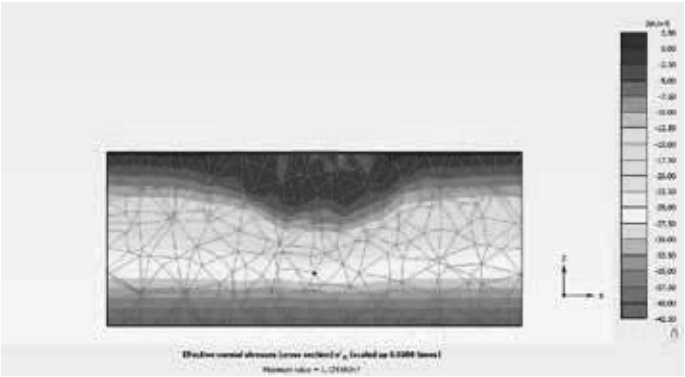
Hình 8. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng kết hợp trên nền đất sét

Trong các trường hợp nền cát, móng đơn tạo ra ứng suất pháp hữu hiệu lớn nhất, đạt 6,23 kN/m^2. Hình 10 cho thấy một đỉnh ứng suất tập trung rõ rệt ngay dưới đáy móng. Do diện tích tiếp xúc nhỏ, cường độ ứng suất tăng cao và bầu ứng suất hình thành dốc và hẹp. Ứng xử này phù hợp với lý thuyết, vì móng đơn trên nền cát chặt có thể huy động sức kháng cắt lớn, đồng thời gây ra tập trung ứng suất cục bộ cao do tải trọng phân bố trên diện tích nhỏ.



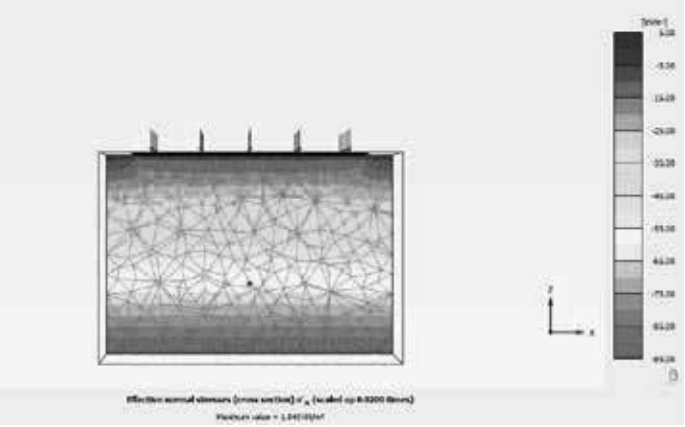
Hình 9. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng đơn trên nền đất cát

Trên nền sét, móng đơn có giá trị σ'max khoảng 1,12 kN/m^2, tương tự trường hợp móng kết hợp trên nền sét. Phân bố ứng suất thể hiện qua các đường đồng mức cho thấy một bầu ứng suất rộng nhưng nông (Hình 11). Đỉnh ứng suất thấp và phạm vi lan rộng phản ánh khả năng phân tán tải của đất sét cũng như sự phân bố tải trên diện tích lớn hơn. Giá trị ứng suất hữu hiệu thấp phù hợp với độ lún lớn đã quan sát trước đó, cho thấy độ cứng hạn chế của đất sét.



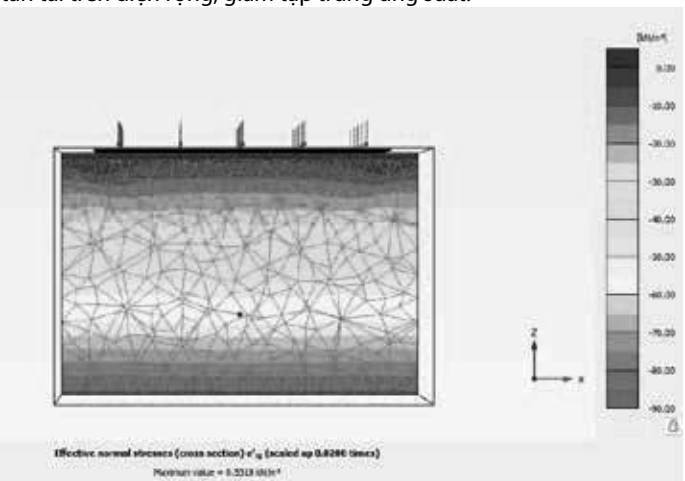
Hình 10. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng đơn trên nền đất sét

Trên nền cát, móng bè có giá trị σ'max bằng 1,90 kN/m^2, thấp hơn đáng kể so với móng đơn và móng kết hợp trên cùng loại đất. Hình 12 cho thấy các đường đồng mức ứng suất nông và lan rộng, phản ánh khả năng phân bố tải hiệu quả của móng bè trên bề mặt đất. Phân bố ứng suất rộng dẫn đến giảm cường độ ứng suất và do đó giảm độ lún. Điều này minh họa rõ ưu điểm của móng bè trên nền đất hạt rời, phân tán ứng suất tốt.



Hình 11. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng bè trên nền đất cát

Trong tất cả các trường hợp, móng bè trên nền sét có giá trị ứng suất hữu hiệu nhỏ nhất, với σ'max = 0,53 kN/m^2. Bầu ứng suất trong Hình 13 có dạng rộng và lan sâu hơn, nhưng cường độ vẫn thấp do điều kiện không thoát nước của đất sét. Phần lớn tải trọng làm tăng áp lực nước lỗ rỗng thay vì ứng suất hữu hiệu, điều này giải thích giá trị σ' thấp và độ lún ở mức trung bình đã trình bày trước đó. Diện tích tiếp xúc lớn của móng bè cũng góp phần phân tán tải trên diện rộng, giảm tập trung ứng suất.



Hình 12. Ứng suất pháp hữu hiệu của móng bè trên nền đất sét

Các kết quả trên cho thấy hình dạng móng và loại đất (cùng với cơ chế ứng xử đặc trưng của đất) là những yếu tố chính chi phối giá trị và phân bố ứng suất hữu hiệu. Đất cát thể hiện giá trị σ' cao hơn do là môi trường thoát nước và chịu lực ma sát, giúp truyền tải trực tiếp qua tiếp xúc hạt–hạt và tạo ra bầu ứng suất sắc nét. Ngược lại, đất sét trong điều kiện không thoát nước tạo ra σ' thấp hơn nhiều do áp lực nước lỗ rỗng dư hạn chế sự huy động ứng suất hữu hiệu, dẫn đến phân tán tải trên phạm vi rộng hơn. Các móng có diện tích lớn như móng bè làm giảm cường độ ứng suất xuống mức thấp nhất, trong khi móng đơn tạo ra tập trung ứng suất cao do diện tích tiếp xúc nhỏ với nền đất.

3.3. Thảo luận

Ứng xử của móng nông trên nền đất cát và đất sét thể hiện sự khác biệt rõ rệt. Nền đất cát có độ cứng cao hơn, khả năng huy động sức kháng cắt nhanh hơn và phân bố ứng suất đồng đều hơn dưới đáy móng. Ứng xử này giúp hạn chế biến dạng thẳng đứng, tạo ra bầu ứng suất rộng và phân tán hơn, đồng thời tránh tập trung mô men uốn lớn trong móng. Độ lún trên nền cát đối với tất cả các loại móng đều nhỏ hơn đáng kể, và trường ứng suất chính duy trì dạng cong trơn, hầu như không xuất hiện hiện tượng tập trung cục bộ. Ngược lại, đối với đất sét, cơ chế ứng xử hoàn toàn khác. Độ cứng không thoát nước thấp và chịu ảnh hưởng lớn bởi áp lực nước lỗ rỗng. Điều này khiến tải trọng tác dụng tạo ra vùng biến dạng sâu và rộng hơn. Áp lực nước lỗ rỗng dư làm giảm ứng suất hữu hiệu, cho thấy đất đang tiến gần đến trạng thái phá hoại không thoát nước. Độ lún lớn đi kèm với sự thay đổi trạng thái ứng suất và sự xoay của phương ứng suất chính. Hiện tượng này làm tăng độ cong uốn, đặc biệt ở móng đơn. Các dải cắt trong đất sét hình thành ở mức tải nhỏ hơn và trong phạm vi hẹp hơn, phản ánh cường độ và độ cứng thấp của đất.

Tổng thể, nền cát thể hiện tính ổn định cao nhờ khả năng thoát nước và độ cứng lớn, trong khi nền sét gây ra biến dạng lớn do tính nén lún cao và ảnh hưởng của áp lực nước lỗ rỗng. Khi đánh giá xu hướng độ lún và phân bố ứng suất, có thể thấy sự tương tác giữa loại đất và hình học móng đóng vai trò quyết định: trên nền sét, móng đơn chịu ảnh hưởng bất lợi nhất, trong khi móng bè ít bị ảnh hưởng hơn nhờ khả năng phân tán tải trọng trên diện rộng. Những xu hướng này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xét đến điều kiện thoát nước, cơ chế tiêu tán ứng suất và độ cứng đất khi lựa chọn loại móng trong thực tế thiết kế.

4. KẾT LUẬN

Qua các bài toán phân tích thực hiện trong Plaxis, có thể thấy rằng khả năng làm việc của móng nông chịu ảnh hưởng đáng kể bởi sự tương tác giữa độ cứng của đất, điều kiện thoát nước và hình dạng móng. Trong tất cả các trường hợp, nền đất cát cho thấy khả năng chịu lực tốt nhất, đặc trưng bởi độ lún nhỏ, bầu ứng suất nông và quỹ đạo ứng suất chính rõ ràng; phản ánh thông qua khả năng thoát nước và xu hướng giãn nở cao của đất. Ngược lại, nền đất sét gây ra độ lún lớn hơn nhiều, hình thành các bầu biến dạng sâu hơn và làm tăng yêu cầu về mômen uốn trong móng đơn và móng kết hợp do khả năng thoát nước thấp và sự chi phối của áp lực nước lỗ rỗng.

Trong số các loại móng được nghiên cứu, thứ tự về hiệu quả làm việc khá nhất quán. Móng bè thể hiện ứng xử ổn định nhất và có khả năng phân bố ứng suất hiệu quả trên cả hai loại nền đất. Ngược lại, móng đơn cho thấy độ lún và mô men uốn lớn nhất trên nền đất sét. Móng kết hợp có hiệu quả trung gian: làm việc rất tốt trên nền cát nhưng chịu ảnh hưởng đáng kể trong điều kiện đất sét không thoát nước.

Nhìn chung, kết quả cho thấy nền cát chặt có xu hướng ứng xử cứng với biến dạng nhỏ, trong khi đất sét mềm thể hiện ứng xử chi phối bởi độ lún, áp lực nước lỗ rỗng và tính nén lún cao. Những phát hiện này nhấn mạnh sự cần thiết phải lựa chọn hệ móng phù hợp với điều kiện địa kỹ thuật tại công trình: đối với đất sét dính mềm nên ưu tiên móng bè để giảm lún lệch; còn đối với nền cát chặt, nơi ứng suất được phân tán nhanh và độ lún nhỏ, móng đơn và móng kết hợp là các giải pháp hiệu quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M Khosrojerdi, M Xiao, T Qiu, and J Nicks. Nonlinear Equation for Predicting the Settlement of Reinforced Soil Foundations. 2019.

[2] H Qiu, S Shi, and M Li. Analysis of large-size flexible shallow foundation settlement basing on foundation-soil interaction. 2012.

[3] S Cong, L Tang, X Ling, L Geng, and J Lu. Numerical analysis of liquefaction-induced differential settlement of shallow foundations on an island slope. 2021.

[4] IO Aghedo. Finite element parametric study on the performance of strip footings on a purely frictional soil using plaxis 2D. 2021.

[5] WT Oh and SK Vanapalli. Modelling the settlement behaviour of in situ shallow foundations in unsaturated sands. Geotechnique, vol. 62, no. 9, pp. 779-790, 2012.

[6] W Ferreira, PC Senez, and M D Casagrande. PET fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. Construction and Building Materials, vol. 295, p. 123605, 2021.

[7] EG Diaz-Segura and F Rodríguez-Roa. Design load of rigid footings on sand. Dyna (Colombia), vol. 77, no. 164, pp. 152-161, 2010.

[8] TH Al-Rahal, HE Ali, and YM Al-Badran. Failure Risks at the Bashtapia Castle Due to Fluctuations in Tigris River Levels. Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 15, no. 4, pp. 25363-25368, Aug. 2025.

[9] MQ Waheed and NM Asmael. Parametric study of shallow foundation bearing capacity in clayey soil. 2018.

[10] B Al-Dawoodi, M Waheed, and F Rahil. Numerical Modeling of Shallow Foundation Behavior Using Soft Soil Model. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 961, no. 1, p. 012057, Jan. 2022.

[11] B Schneider-Muntau and I Bathaeian. Simulation of settlement and bearing capacity of shallow foundations with soft particle code (SPARC) and FE. GEM - Int. J. Geomath., vol. 9, no. 2, pp. 359-375, Nov. 2018.

[12] A Kalos. Numerical Investigation of the Bearing Capacity of Strip and Rectangular Shallow Footings on Cohesive Frictional Soils Under Eccentric Loads. 2022.

[13] AI Ali. Evaluation of clay layer presence on shallow foundation settlement in dry sand under an earthquake. 2024.

[14] B Ateş and E Şadoğlu. Experimental and Numerical Investigation of Load-Settlement Behaviour to Model Shallow Foundation rest on Sandy Soil. Erzincan Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 14, no. 2, pp. 686-703, Aug. 2021.

[15] N Aarthi and GR Dodagoudar. Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Pressure-Settlement Response of Sand Compaction Pile-Treated Cohesionless Deposits. Int. J. Geomech., vol. 21, no. 4, p. 04021019, Apr. 2021.

■Ngày nhận bài: 28/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Phân tích ổn định phi tuyến của hệ khung phẳng bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Nonlinear stability analysis of plane frame systems using the finite element method

> PGS.TS TRẦN THỊ THÚY VÂN*, TS ĐÀO NGỌC KHOA
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
*Email: vanttt@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu ứng xử ổn định của hệ khung phẳng chịu nén bằng phương pháp phần tử hữu hạn, với trọng tâm là ảnh hưởng của phi tuyến hình học đến khả năng chịu lực của kết cấu. Trong khi phân tích ổn định tuyến tính (eigenvalue buckling) cho phép xác định tải trọng tới hạn một cách nhanh chóng, phương pháp này thường đánh giá cao khả năng chịu tải của kết cấu do bỏ qua sự thay đổi hình học trong quá trình biến dạng. Do đó, một mô hình phân tích phi tuyến được xây dựng trong môi trường ANSYS APDL nhằm mô phỏng chính xác đường cân bằng của hệ kết cấu. Một khung phẳng hai tầng hai nhịp được lựa chọn làm bài toán nghiên cứu điển hình. Kết quả cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa tải trọng tới hạn thu được từ phân tích tuyến tính và phi tuyến. Ngoài ra, ảnh hưởng của biến dạng ban đầu đến ứng xử ổn định cũng được xem xét, cho thấy khả năng làm giảm đáng kể tải trọng tới hạn của kết cấu. Nghiên cứu khẳng định sự cần thiết của phân tích phi tuyến trong thiết kế kết cấu thực tế.

Từ khóa: Ổn định phi tuyến; hệ khung phẳng; phương pháp phần tử hữu hạn; phân tích ổn định; phi tuyến hình học; tải trọng tới hạn; ANSYS APDL

ABSTRACT

This study investigates the nonlinear stability behavior of planar frame structures using the finite element method, with emphasis on the influence of geometric nonlinearity on structural response. Linear eigenvalue buckling analysis is commonly used to estimate the critical load; however, it neglects the effect of deformation on the structural configuration and may overestimate the load-carrying capacity. To address this limitation, a nonlinear analysis framework is developed in the ANSYS APDL environment to capture the full equilibrium path of the structure. A two-story, two-span planar frame is considered as a representative example. The results show a noticeable difference between critical loads obtained from linear and nonlinear analyses, highlighting the importance of considering geometric nonlinearity. The load–displacement relationship further reveals the reduction of structural stiffness and the occurrence of instability beyond a limit point. The findings demonstrate that nonlinear analysis provides a more realistic prediction of structural behavior and is essential for reliable stability assessment of slender frame systems.

Keywords: Nonlinear stability; planar frame structures; finite element method; buckling analysis; geometric nonlinearity; critical load; ANSYS APDL

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ổn định kết cấu là một trong những vấn đề cơ bản và quan trọng trong cơ học công trình, đặc biệt đối với các hệ kết cấu dạng thanh và khung chịu nén. Trong nhiều trường hợp, kết cấu có thể mất khả năng chịu lực do hiện tượng mất ổn định trước khi ứng suất trong vật liệu đạt đến giới hạn bền. Lý thuyết ổn định đàn hồi cổ điển đã được phát triển và hệ thống hóa trong nhiều công trình nền tảng trong cơ học công trình [1]. Đối với các hệ kết cấu thực tế như khung phẳng, khung không gian hoặc hệ thanh mảnh, ứng xử ổn định chịu ảnh hưởng mạnh bởi hình học kết cấu, điều kiện biên, tải trọng tác dụng cũng như tương tác giữa lực dọc và chuyển vị ngang.

Trong thực hành kỹ thuật, các phương pháp giải tích cổ điển thường gặp nhiều hạn chế khi áp dụng cho các hệ kết cấu có hình học và điều kiện liên kết phức tạp [1]. Do đó, phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM) đã trở thành công cụ hiệu quả và được sử dụng rộng rãi trong phân tích kết cấu hiện đại [2–4]. Các nghiên cứu về FEM cho thấy phương pháp này cho phép mô hình hóa chi tiết ứng xử của kết cấu, đồng thời xử lý hiệu quả các bài toán ổn định và phi tuyến có mức độ phức tạp cao [5–8].

Phân tích ổn định tuyến tính dựa trên bài toán trị riêng vẫn được sử dụng phổ biến để xác định tải trọng tới hạn và dạng mất ổn định của kết cấu [3]. Tuy nhiên, phương pháp này được xây dựng trên giả thiết biến dạng nhỏ và không xét đến sự thay đổi hình học trong quá trình chịu tải. Vì vậy, kết quả thu được thường phản ánh trạng thái ổn định lý tưởng và có xu hướng đánh giá cao khả năng chịu lực thực tế của hệ kết cấu [4,5]. Đối với các hệ khung mảnh, ảnh hưởng của phi tuyến hình học và hiệu ứng P–Δ có thể làm suy giảm

đáng kể độ cứng tổng thể, từ đó làm giảm tải trọng tới hạn của kết cấu [6].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào phân tích phi tuyến và ứng xử sau mất ổn định của các hệ kết cấu dạng khung và vòm bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Shaukat và cộng sự [9] đã nghiên cứu ứng xử post-buckling của kết cấu vòm bằng phương pháp arc-length kết hợp với công thức phần tử phi tuyến. Goriely và cộng sự [10] đã chỉ ra rằng ảnh hưởng của phi tuyến hình học có vai trò quan trọng trong ứng xử mất ổn định của các cấu kiện mảnh. Santos và cộng sự [11] đã thực hiện phân tích phi tuyến của hệ khung phẳng bằng phương pháp phần tử hữu hạn vị trí, cho thấy khả năng mô phỏng hiệu quả ứng xử phi tuyến của hệ kết cấu. Ngoài ra, Thai và cộng sự [12] đã đề xuất phần tử dầm đơn giản phục vụ phân tích phi tuyến hình học của hệ khung không gian, góp phần nâng cao hiệu quả và độ ổn định của quá trình tính toán số.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến phân tích phi tuyến của hệ kết cấu, việc đánh giá định lượng sự khác biệt giữa phân tích ổn định tuyến tính và phân tích phi tuyến hình học đối với hệ khung phẳng vẫn chưa được làm rõ đầy đủ trong nhiều nghiên cứu ứng dụng. Bên cạnh đó, việc mô phỏng quá trình chuyển tiếp từ trạng thái làm việc ổn định đến trạng thái sau mất ổn định của hệ khung thông qua đường cân bằng tải trọng - chuyển vị vẫn là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn trong phân tích và thiết kế kết cấu.

Do đó, bài báo này tập trung nghiên cứu ứng xử ổn định phi tuyến của hệ khung phẳng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình tính toán được xây dựng trong môi trường ANSYS APDL và áp dụng cho bài toán khung phẳng hai tầng hai nhịp. Nghiên cứu thực hiện đồng thời phân tích ổn định tuyến tính và phân tích phi tuyến hình học nhằm đánh giá ảnh hưởng của hiệu ứng P–Δ và sự thay đổi hình học đến tải trọng tới hạn cũng như ứng xử của kết cấu. Đường cân bằng tải trọng - chuyển vị (P–Δ) được sử dụng để mô tả quá trình làm việc của hệ từ giai đoạn đàn hồi ban đầu đến trạng thái sau mất ổn định. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ vai trò của phân tích phi tuyến trong đánh giá an toàn ổn định của các hệ khung mảnh, đồng thời cung cấp cơ sở tham khảo cho việc ứng dụng ANSYS APDL trong các bài toán ổn định kết cấu thực tế.

2. MÔ TẢ BÀI TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN

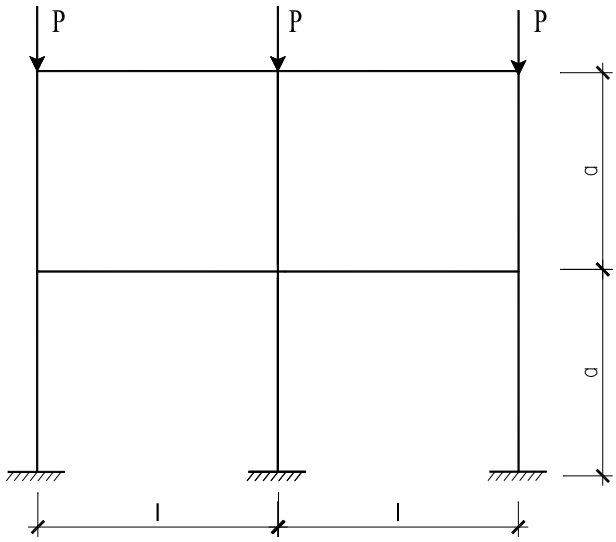
2.1. Mô tả bài toán và mô hình phần tử hữu hạn

Trong nghiên cứu này, một hệ khung phẳng hai tầng hai nhịp được lựa chọn làm mô hình điển hình để phân tích ổn định. Hệ kết cấu bao gồm các cột và dầm liên kết cứng với nhau, trong đó các chân cột được giả thiết là liên kết ngàm, còn các nút dầm - cột được coi là liên kết cứng, cho phép truyền mô men uốn.

Tải trọng nén được áp dụng tại các nút trên đỉnh khung và tăng dần theo một hệ số tải nhằm khảo sát quá trình mất ổn định của hệ. Vật liệu được giả thiết làm việc trong miền đàn hồi tuyến tính, trong khi ảnh hưởng của phi tuyến hình học được xét đến thông qua mô hình biến dạng lớn.

Các cấu kiện của khung được giả thiết có tiết diện và vật liệu giống nhau, với tiết diện chữ nhật kích thước 0.10 m×0.10 m. Vật liệu được giả thiết là thép đàn hồi tuyến tính với mô đun đàn hồi $E=2{,}1\times10^{11}$ Pa.

Hệ kết cấu được mô hình hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn với các phần tử dạng dầm, cho phép xét đồng thời biến dạng dọc trục và uốn. Ma trận độ cứng tổng thể của hệ được thiết lập thông qua quá trình lắp ráp các phần tử theo nguyên lý cân bằng [8]. Mô hình này cho phép đánh giá trực tiếp sự khác biệt giữa phân tích tuyến tính và phi tuyến đối với cùng một hệ kết cấu.



Hình 1. Mô hình khung 2 tầng 2 nhịp trong phân tích ổn định tuyến tính

2.2. Phương pháp phân tích ổn định

Trong phân tích ổn định tuyến tính, bài toán được xây dựng dưới dạng bài toán trị riêng:

$$(K+\lambda K_g)\cdot\varphi=0 \quad (1)$$

trong đó K là ma trận độ cứng đàn hồi, K_g là ma trận độ cứng hình học, λ là hệ số tải trọng tới hạn và φ là dạng mất ổn định tương ứng [9]. Phương pháp này cho phép xác định nhanh tải trọng tới hạn và dạng mất ổn định, nhưng không xét đến ảnh hưởng của biến dạng lớn.

Đối với phân tích phi tuyến, phương trình cân bằng được thiết lập trên cấu hình đã biến dạng của kết cấu và được giải bằng phương pháp lặp [10]. Tải trọng được tăng dần theo từng bước, đồng thời trạng thái cân bằng được cập nhật tương ứng để xác định quan hệ tải trọng – chuyển vị của hệ. Phương pháp này cho phép mô tả đầy đủ quá trình làm việc của kết cấu, bao gồm cả giai đoạn sau mất ổn định và sự xuất hiện của điểm giới hạn.

Các phân tích được thực hiện bằng phần mềm ANSYS APDL, cho phép xây dựng mô hình, điều khiển quá trình tính toán và thu thập kết quả một cách hiệu quả. Việc kết hợp giữa phân tích tuyến tính và phi tuyến giúp làm rõ ảnh hưởng của phi tuyến hình học đến ứng xử ổn định của hệ khung phẳng.

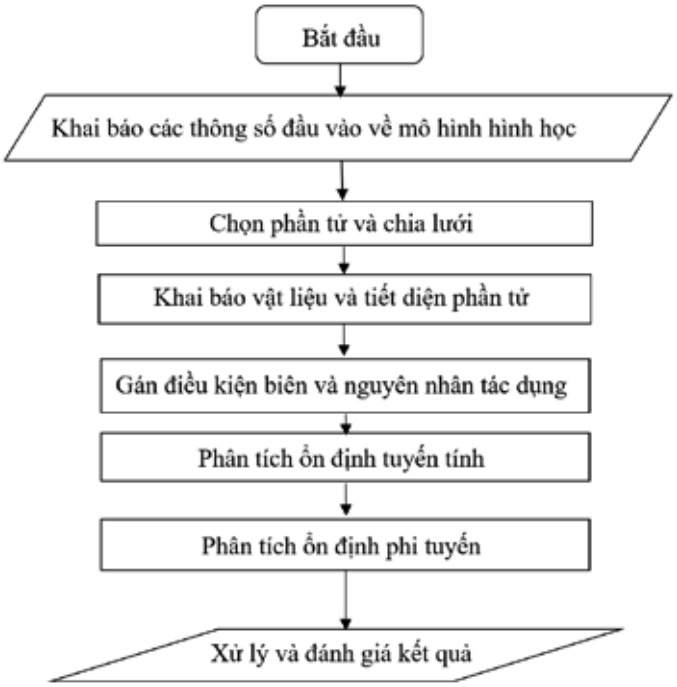
2.3. Áp dụng script APDL trong quá trình phân tích

Trong nghiên cứu này, ngoài việc xây dựng mô hình bằng giao diện đồ họa của phần mềm ANSYS, việc phân tích còn được thực hiện thông qua các script APDL (ANSYS Parametric Design Language). APDL cho phép tự động hóa quá trình thiết lập mô hình, thực hiện phân tích và trích xuất kết quả tính toán.

Thông qua việc sử dụng script APDL, toàn bộ quá trình phân tích được thực hiện theo một trình tự xác định, bao gồm việc khai báo phần tử, định nghĩa đặc trưng vật liệu, thiết lập mô hình hình học, gán điều kiện biên và tải trọng cũng như thực hiện quá trình giải bài toán. Ngoài ra, APDL còn cho phép trích xuất các kết quả quan trọng như phản lực nút, chuyển vị của các điểm đặc trưng và các đại lượng cần thiết để xây dựng đường quan hệ tải trọng – chuyển vị của kết cấu.

Việc sử dụng script APDL giúp đảm bảo tính lặp lại của quá trình tính toán, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc thực hiện nhiều trường hợp phân tích khác nhau. Đây cũng là một ưu điểm quan trọng khi nghiên cứu các bài toán ổn định kết cấu, trong đó cần khảo sát ảnh hưởng của nhiều tham số khác nhau đến khả năng ổn định của hệ.

2.4. Sơ đồ khối bài toán phân tích ổn định



Hình 2. Sơ đồ khối bài toán phân tích ổn định hệ thanh phẳng bằng phần mềm Ansys

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả phân tích ổn định tuyến tính

Kết quả phân tích cho thấy tải trọng tới hạn thu được từ phương pháp ổn định tuyến tính lớn hơn đáng kể so với kết quả từ phân tích phi tuyến. Điều này là do phương pháp tuyến tính được xây dựng trên giả thiết biến dạng nhỏ và không xét đến sự thay đổi hình học của kết cấu trong quá trình chịu tải.

Trong khi đó, phân tích phi tuyến cho phép xét đến ảnh hưởng của biến dạng lớn và hiệu ứng P–Δ, dẫn đến sự suy giảm độ cứng tổng thể của hệ kết cấu. Do đó, tải trọng tới hạn xác định theo phân tích phi tuyến phản ánh chính xác hơn khả năng chịu lực thực tế của hệ khung.

Sự sai khác giữa hai phương pháp trở nên rõ rệt hơn đối với các hệ kết cấu có độ mảnh lớn, trong đó ảnh hưởng của phi tuyến hình học đóng vai trò chi phối trong quá trình mất ổn định.

Kết quả phân tích ổn định tuyến tính của hệ khung phẳng hai tầng hai nhịp được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Hệ số tải trọng tới hạn của hệ khung phẳng hai tầng hai nhịp

Mode dao động	Hệ số ổn định λ
1	2,2823
2	3,9983
3	6,8893
4	11,7085
5	12,5190

Kết quả trong Bảng 1 cho thấy hệ số tải trọng tới hạn của dạng mất ổn định đầu tiên đạt giá trị λ_1 = 2,2823. Đây là dạng mất ổn định chi phối, quyết định khả năng chịu lực của hệ kết cấu. Các dạng mất ổn định bậc cao có giá trị hệ số tải trọng lớn hơn đáng kể, cho thấy ảnh hưởng của chúng đến trạng thái làm việc của kết cấu là không đáng kể trong giai đoạn đầu.

Kết quả này được sử dụng làm cơ sở để so sánh với phân tích phi tuyến trong các phần tiếp theo, nhằm đánh giá mức độ sai khác giữa hai phương pháp và làm rõ ảnh hưởng của phi tuyến hình học đến tải trọng tới hạn của hệ khung.

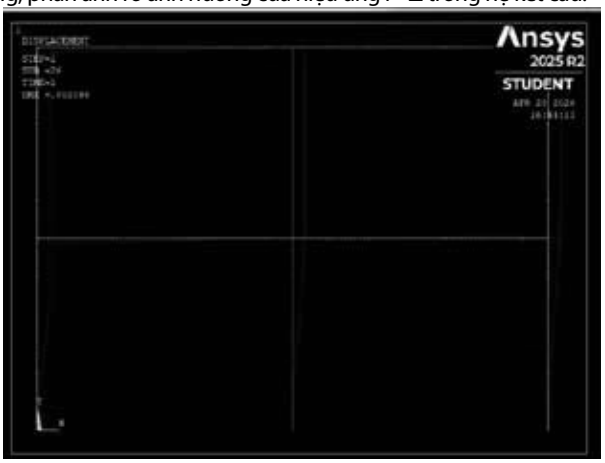
Do tải trọng tham chiếu được đặt tại đồng thời 3 nút trên đỉnh khung với giá trị P=100kN cho mỗi nút, tổng tải trọng tham chiếu của hệ là P_{ref}=3·100=300kN

Khi đó tải trọng tới hạn của hệ khung có thể xác định theo biểu thức: $P_{cr}=\lambda_1 \cdot P$ = 2,2823×300=684,69kN. Như vậy, tải trọng tới hạn gây mất ổn định cho hệ khung trong dạng mất ổn định thứ nhất xấp xỉ 684,69 kN.

Quan sát dạng mất ổn định thu được từ ANSYS cho thấy hệ khung có xu hướng uốn ngang tổng thể, trong đó các cột của khung bị cong theo phương ngang. Đây là dạng mất ổn định đặc trưng của các hệ khung chịu tải trọng nén theo phương thẳng đứng. Các dạng mất ổn định bậc cao hơn (mode 2, mode 3, …) thể hiện những dạng biến dạng phức tạp hơn của hệ khung, tuy nhiên trong thực tế thiết kế, dạng mất ổn định đầu tiên thường được xem là dạng nguy hiểm nhất và được sử dụng để đánh giá khả năng ổn định của kết cấu.

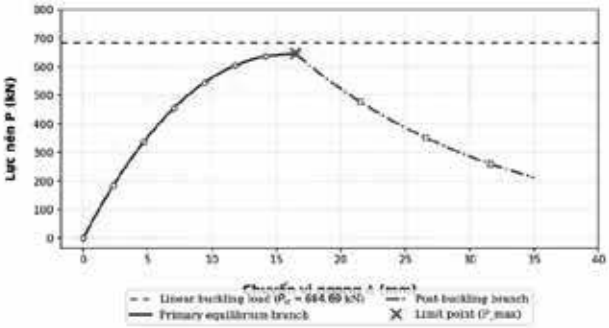
3.2. Quan hệ tải trọng – chuyển vị và ảnh hưởng của phi tuyến hình học

Sau khi thực hiện phân tích phi tuyến hình học, khung xuất hiện chuyển vị ngang tổng thể theo phương tác dụng của tải ngang nhỏ. Giá trị chuyển vị ngang tại nút đỉnh giữa tăng dần theo mức tải nén thẳng đứng, phản ánh rõ ảnh hưởng của hiệu ứng P–Δ trong hệ kết cấu.



Hình 3. Sơ đồ biến dạng của khung khi phân tích ổn định phi tuyến bằng Ansys

So với phân tích ổn định tuyến tính, kết quả phi tuyến cho thấy độ cứng tổng thể của hệ giảm dần khi tải trọng tiến gần đến giá trị tới hạn. Trong trường hợp này, trạng thái mất ổn định không còn được biểu diễn chỉ bằng một hệ số tải tới hạn duy nhất, mà được thể hiện thông qua sự phát triển nhanh của chuyển vị ngang khi tải tăng lên. Đồ thị quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị ngang của nút đỉnh giữa có thể được sử dụng để đánh giá quá trình tiến gần đến trạng thái mất ổn định của khung. Về mặt bản chất, phân tích phi tuyến hình học cho phép mô tả ứng xử của hệ khung sát thực tế hơn so với phân tích ổn định tuyến tính, bởi vì phương pháp này xét đến ảnh hưởng của sự thay đổi hình học trong quá trình biến dạng.



Hình 4. Đường cân bằng P–Δ của khung 2 tầng 2 nhịp

Hình 4. Đường cân bằng tải - chuyển vị (P–Δ) của khung phẳng 2 tầng 2 nhịp thu được từ phân tích ổn định phi tuyến.

Ứng xử ổn định của hệ khung phẳng hai tầng hai nhịp được mô phỏng chi tiết thông qua đường cân bằng tải trọng – chuyển vị (P–Δ) tại Hình 4. Đồ thị này cung cấp cái nhìn toàn diện về quá trình biến dạng của kết cấu, từ giai đoạn gia tải ban đầu cho đến khi sụp đổ hoàn toàn.

Trong giai đoạn đầu, dưới tác dụng đồng thời của tải trọng nén thẳng đứng và nhiễu ngang, kết cấu làm việc theo nhánh cân bằng chính (primary equilibrium branch). Tại đây, tải trọng P tăng dần song hành với sự gia tăng của chuyển vị ngang Δ. Tuy nhiên, dưới tác động của hiệu ứng phi tuyến hình học và hiệu ứng P–Δ, độ cứng tổng thể của hệ khung có xu hướng suy giảm dần. Điều này được thể hiện rõ nét qua độ dốc của đường cân bằng giảm dần khi tải trọng tiến gần đến ngưỡng tới hạn.

Hệ kết cấu chính thức rơi vào trạng thái mất ổn định khi đạt tới điểm giới hạn (limit point), tương ứng với tải trọng cực đại $P_{max} \approx$ 645,5 kN và chuyển vị ngang đỉnh khung đạt 16,5 mm. Khi so sánh với kết quả từ phân tích ổn định tuyến tính ($P_{cr} \approx$ 684,69 kN - biểu diễn bằng đường ngang nét đứt), tải trọng cực đại thực tế thấp hơn khoảng 5,7%. Sự chênh lệch này phản ánh mức độ nhạy cảm của khung đối với sai lệch hình học và biến dạng lớn; đồng thời khẳng định rằng phân tích tuyến tính chỉ đưa ra ngưỡng lý tưởng cho hệ hoàn hảo, trong khi phân tích phi tuyến mô tả sát thực hơn khả năng chịu lực thực tế của công trình.

Sau khi vượt qua điểm giới hạn, đường cân bằng chuyển sang nhánh sau mất ổn định (post-buckling branch). Ở giai đoạn này, hệ khung không còn khả năng duy trì cân bằng: tải trọng mà hệ có thể chịu đựng sụt giảm nhanh chóng trong khi chuyển vị ngang tiếp tục gia tăng mạnh. Đây là minh chứng điển hình cho tính chất sụp đổ không ổn định của hệ khung cao tầng sau khi vượt quá ngưỡng chịu tải cho phép.

Tóm lại, việc kết hợp cả hai phương pháp phân tích cho thấy một cái nhìn toàn diện về ứng xử của công trình: phân tích tuyến tính xác định nhanh giới hạn trên lý thuyết, trong khi phân tích phi tuyến hình học cho phép mô phỏng toàn bộ quá trình từ khi bắt đầu gia tải, đi qua điểm giới hạn cho đến giai đoạn sụp đổ sau mất ổn định. Việc Pmax nhỏ hơn Pcr là minh chứng cho tính đúng đắn về mặt cơ học khi xét đến các yếu tố phi tuyến trong bài toán ổn định khung cao tầng.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày phân tích ổn định phi tuyến của hệ khung phẳng bằng phương pháp phần tử hữu hạn, với việc so sánh giữa phân tích ổn định tuyến tính và phi tuyến hình học. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Phân tích ổn định tuyến tính cho phép xác định nhanh tải trọng tới hạn và dạng mất ổn định, tuy nhiên chỉ phản ánh trạng thái tới hạn lý tưởng và không mô tả được quá trình biến dạng của kết cấu.

- Phân tích phi tuyến hình học cho phép mô tả đầy đủ quan hệ tải trọng - chuyển vị (P–Δ), bao gồm cả giai đoạn trước và sau mất ổn định, từ đó phản ánh chính xác hơn ứng xử thực tế của hệ khung.

- Đường cân bằng tải - chuyển vị thể hiện rõ sự suy giảm độ cứng của kết cấu khi tải trọng tăng, đồng thời xác định được điểm giới hạn (limit point), tương ứng với khả năng chịu lực cực đại của hệ.

- Mặc dù tải trọng tới hạn từ phân tích tuyến tính và tải trọng cực đại từ phân tích phi tuyến có ý nghĩa cơ học khác nhau, việc so sánh hai giá trị này vẫn cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của phi tuyến hình học đến khả năng chịu lực của hệ kết cấu

- Ảnh hưởng của phi tuyến hình học đóng vai trò quan trọng đối với các hệ kết cấu mảnh, trong đó hiệu ứng P–Δ có thể chi phối hoàn toàn ứng xử ổn định của kết cấu.

Từ các kết quả trên, có thể khẳng định rằng phân tích phi tuyến là cần thiết để đánh giá chính xác khả năng ổn định của hệ khung phẳng, đặc biệt trong các bài toán thiết kế kết cấu thực tế. Phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp với phần mềm ANSYS APDL là công cụ hiệu quả cho việc mô phỏng và phân tích các bài toán ổn định phi tuyến trong kỹ thuật xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Timoshenko, S.P., Gere, J.M. Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill, 1961.

[2] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. The Finite Element Method. Butterworth-Heinemann, 2005.

[3] Bathe, K.J. Finite Element Procedures. Prentice Hall, 1996.

[4] Crisfield, M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. John Wiley & Sons, 1991.

[5] Reddy, J.N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. Oxford University Press, 2004.

[6] Belytschko, T., Liu, W.K., Moran, B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons, 2014.

[7] McGuire, W., Gallagher, R.H., Ziemian, R.D. Matrix Structural Analysis. John Wiley & Sons, 2000.

[8] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., Witt, R.J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, 2002.

[9] Shaukat, A.R., Wu, Z., Ding, H. In-plane nonlinear postbuckling analysis of circular arches using absolute nodal coordinate formulation and arc-length method. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 40, No. 3, pp. 1415-1434, 2021.

[10] Goriely, A., Vandiver, R., Destrade, M. Nonlinear Euler buckling. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 464, No. 2099, pp. 3003-3019, 2008. doi: 10.1098/rspa.2008.0184.

[11] Santos, L., Maciel, D.N., Barros, R., Neto, J.A.N., Silva Filho, J.N. Nonlinear analysis of plane frames considering hyperelastic models through the finite element positional method. Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 21, No. 8, e559, 2024. doi: 10.1590/1679-78258158.

[12] Thai, H.T., Ngo, T.D., Uy, B. A simple beam element for geometrically nonlinear analysis of space frames. Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 100, pp. 14-25, 2015.

■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Nghiên cứu dao động riêng của dầm hai lớp có lỗ rỗng vi mô trên nền đàn hồi pasternak chịu nén dọc trục

Free vibration analysis of a two-layer beam with microscale porous voids on a pasternak elastic foundation under axial compression

> **GS.TS HOÀNG XUÂN LƯỢNG[1], THS NGUYỄN XUÂN QUÂN[2], THS LÊ TUẤN ANH[3], TS NGUYỄN CHÍ THỌ[1,*], THS NGUYỄN BÁ NGỌC THẢO[4]**

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự; [*]Email: chitho.mta@gmail.com

[2]Sở Xây dựng Hà Nội, TP Hà Nội

[3]Cục Kinh tế quản lý đầu tư xây dựng, Bộ Xây dựng

[4]Khoa Kỹ thuật công trình, Đại học Lạc Hồng

TÓM TẮT

Cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, ngành vật liệu xây dựng cũng đã phát minh và sử dụng nhiều loại vật liệu tiên tiến và một trong số đó chính là vật liệu có lỗ rỗng. Đây là loại vật liệu có khả năng chịu nhiệt và cách âm hiệu quả, đặc biệt là sử dụng làm kết cấu trong công trình xây dựng. Nghiên cứu này dựa trên lời giải dạng giải tích để chỉ ra đáp ứng dao động riêng của dầm hai lớp làm từ vật liệu chứa lỗ rỗng vi mô, tựa trên nền đàn hồi hai hệ số với điều kiện biên tựa đơn hai đầu và chịu tải nén dọc theo trục dầm. Các biểu thức tính toán được thiết lập dựa trên cơ sở lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất của Timoshenko với hệ số hiệu chỉnh cắt k=5/6, trong đó ảnh hưởng của lỗ rỗng đến các đặc trưng cơ tính vật liệu được mô tả bằng hàm phụ thuộc chiều dày dầm. Thông qua các phép biến đổi linh hoạt, công thức chính xác đối với tần số dao động riêng của dầm được xác định. Sự tin cậy của lời giải được minh chứng thông qua so sánh với các kết quả đã công bố trước đây. Cuối cùng, ảnh hưởng của các số tham số hình học, vật liệu của dầm và của lực nén dọc trục đến các tần số dao động riêng đầu tiên của dầm cũng được tính toán và bình luận cụ thể, qua đó góp phần làm rõ ứng xử dao động và cung cấp cơ sở khoa học giúp cho các kỹ sư tham khảo khi thiết kế kết cấu dạng dầm hai lớp có lỗ rỗng.

Từ khóa: Dao động riên; lỗ rỗng; Timoshenko; lời giải Navier; nền đàn hồi Pasternak; nén dọc trục.

ABSTRACT

With the advancement of science and technology, the field of construction materials has developed and adopted various advanced materials, among which porous materials have gained significant attention. These materials exhibit excellent thermal resistance and acoustic insulation properties, making them particularly suitable for structural applications in construction. This study employs an analytical solution to investigate the free vibration response of a two-layer beam composed of microscale porous materials, resting on a two-parameter elastic foundation, with simply supported boundary conditions at both ends and subjected to axial compressive loading.

The governing equations are formulated based on the first-order shear deformation theory of Timoshenko, with a shear correction factor of k=5/6. The influence of porosity on the material properties is described by a thickness-dependent function. Through appropriate mathematical transformations, an exact expression for the natural frequencies of the beam is derived. The reliability of the proposed solution is validated through comparisons with previously published results. Finally, the effects of geometric parameters, material properties, and axial compressive load on the first natural frequencies of the beam are evaluated and discussed in detail. The findings contribute to a better understanding of the vibration behavior and provide a scientific basis for engineers in the design of porous two-layer beam structures.

Keywords: Free vibration; porosity; Timoshenko beam theory; Navier solution; Pasternak elastic foundation; axial compression.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

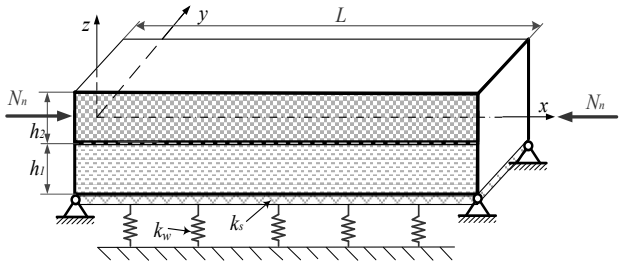
Trong thực tế kỹ thuật xây dựng, khi kết cấu chính được đặt tựa trên một kết cấu khác, người ta có thể mô tả như kết cấu chính tựa trên nền đàn hồi. Mặt khác, để giảm trọng lượng của các kết cấu, các nhà khoa học có thể áp dụng nhiều giải pháp khác nhau như sử dụng vật liệu nhẹ hoặc tối ưu hóa thiết kế kết cấu. Trong số đó, việc tạo ra các lỗ rỗng bên trong vật liệu được xem là một phương pháp hiệu quả. Bên cạnh tác dụng làm giảm khối lượng, sự tồn tại của các lỗ rỗng còn giúp cải thiện khả năng cách âm và cách nhiệt của vật liệu so với vật liệu đặc. Nhờ những ưu điểm này, vật liệu có lỗ rỗng ngày càng được quan tâm và ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật, đặc biệt là trong ngành Xây dựng.

Việc tính toán đáp ứng của các kết cấu dầm trên nền đàn hồi cũng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và đã đạt được một số thành quả. Liên [1] đã kết hợp giữa lý thuyết dầm dạng hàm lượng giác và phần tử hai điểm nút để phân tích dao động tự do của dầm nhiều lớp có lỗ rỗng. Trên cơ sở nhiều lý thuyết biến dạng cắt khác nhau, Trường và các cộng sự [2] đã phân tích dao động của dầm nhiều lớp có lớp bề mặt là vật liệu FGM và lớp lõi là vật liệu FGM dưới nhiều điều kiện biên khác nhau trên cơ sở phương pháp Ritz. Chen và cộng sự [3] cũng xuất phát từ phương pháp Ritz để nghiên cứu dao động tự do và dao động cưỡng bức của dầm được chế tạo từ vật liệu có lỗ rỗng. Charles [4] đã dựa trên lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất để chỉ rõ uốn tĩnh của dầm tựa trên nền đàn hồi. Zghal và các đồng nghiệp [5] đã áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để làm rõ ảnh hưởng của lỗ rỗng vật liệu đến đáp ứng uốn tĩnh của dầm.

Trên cơ sở các kết quả đã nghiên cứu rộng rãi, ta có thể nhận thấy rằng bài toán dao động riêng của dầm hai lớp làm từ vật liệu có lỗ rỗng, tựa trên nền đàn hồi và chịu tác dụng của tải trọng nén dọc theo trục dầm, vẫn chưa được chỉ ra cụ thể bằng công thức giải tích cụ thể. Đây là cách tiếp cận có ý nghĩa thực tiễn vì công thức giải tích cho phép đánh giá nhanh ảnh hưởng của các tham số thiết kế mà không cần chạy mô phỏng số. Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là thiết lập công thức chính xác xác định tần số dao động riêng của dầm hai lớp có lỗ rỗng vi mô, tựa trên nền đàn hồi Pasternak, chịu tải trọng nén dọc trục, trên cơ sở lý thuyết dầm Timoshenko và nghiệm Navier."

2. THIẾT LẬP CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH TẦN SỐ DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA DẦM HAI LỚP CÓ LỖ RỖNG

Hình 1 trình bày mô hình dầm hai lớp tựa trên nền đàn hồi hai hệ số chịu tải trọng nén dọc theo trục dầm N_n. Dầm có chiều dài là L và mặt cắt ngang có chiều dày tổng là h, dầm gồm hai lớp vật liệu với lớp trên (h_2) và lớp dưới (h_1) có chiều dày bằng nhau $h_1 = h_2$.



Hình 1. Dầm hai lớp có lỗ rỗng chịu nén dọc theo trục dầm

Dầm được chế tạo từ vật liệu có lỗ rỗng, thể tích lỗ rỗng trong mỗi lớp của dầm:

$$\begin{cases} \psi_r^{(1)} = \psi_0 \left\{ 1 + k\, sin\left(\dfrac{\pi(4z+h)}{2h} \right) \right\} & : -\dfrac{h}{2} \le z \le 0 \\ \psi_r^{(2)} = \psi_0 \left\{ 1 - k\, sin\left(\dfrac{\pi(4z-h)}{2h} \right) \right\} & : \ 0 \le z \le \dfrac{h}{2} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó k là tham số thể hiện mức độ phân bố các lỗ rỗng, còn ψ_0 là thể tích lỗ rỗng tương ứng với trường hợp $k = 0$.

Các đặc trưng cơ tính vật liệu gồm mô đun hàn hồi và hệ số Poát xông trong lớp thứ i (i=1-2) phụ thuộc vào chiều dày theo tỷ lệ lỗ rỗng:

$$\begin{aligned} E^{(i)}(z) &= E_0^{(i)}\left(1 - \psi_p^{(i)}\right) \\ \nu^{(i)}(z) &= \nu_0^{(i)}\left(1 - \psi_p^{(i)}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó E_0 và ν_0 là mô đun đàn hồi và hệ số Poát xông của vật liệu trong trường hợp không có lỗ rỗng vi mô $\psi_p = 0$.

Để thiết lập biểu thức tính toán cụ thể, nghiên cứu này sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất Timoshenko, do vậy các chuyển vị:

$$\begin{cases} W_x = W_{0x} + z\theta_x \\ W_z = W_{0z} \end{cases} \quad (3)$$

với $W_{0x}(x,0)$, $W_{0z}(x,0)$ là chuyển vị dọc theo trục dầm và chuyển vị vuông góc với trục dầm tại vị trí $z = 0$, và θ_x là góc xoay của pháp tuyến của mặt cắt ngang dầm.

Hai thành phần biến dạng bao gồm biến dạng dài dọc theo trục dầm và biến dạng góc:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial W_x}{\partial x} = \frac{\partial W_{0x}}{\partial x} + z\frac{\partial \theta_x}{\partial x} = \varepsilon_{0x} + z\kappa_{1x} \\ \gamma_{xz} &= \theta_x + \frac{\partial W_{0z}}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó:

$$\varepsilon_{0x} = \frac{\partial W_{0x}}{\partial x},\ \kappa_{1x} = \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad (5)$$

Hai thành phần ứng suất pháp và ứng suất tiếp trong lớp thứ i có dạng:

$$\begin{cases} \sigma_x^{(i)} = E^{(i)}\varepsilon_{xx} \\ \tau_{xz}^{(i)} = \dfrac{E^{(i)}}{2\left(1+\nu^{(i)}\right)}\gamma_{xz} \end{cases} \quad (6)$$

Để tìm ra phương trình cân bằng cho dầm này, nghiên cứu này sử dụng nguyên lý công công ảo:

$$\delta\Theta_d + \delta\Theta_N - \delta\Theta_c - \delta\Theta_I = 0 \quad (7)$$

với $\delta\Theta_d, \delta\Theta_N, \delta\Theta_c, \delta\Theta_I$ lần lượt là công ảo của nội lực, công ảo của nền, công ảo của lực nén tác dụng lên dầm và công ảo của lực quán tính.

Công ảo của dầm do nội lực:

$$\delta\Theta_d = \int_S \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{0} \left(\sigma_x^{(1)}\delta\varepsilon_{xx} + \tau_{xz}^{(1)}\delta\gamma_{xz}\right)dz \\ + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \left(\sigma_x^{(2)}\delta\varepsilon_{xx} + \tau_{xz}^{(2)}\delta\gamma_{xz}\right)dz \end{pmatrix} dS$$

$$= \int_S \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{0} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0x}^T E^{(1)}\delta\varepsilon_{0x} + \varepsilon_{0x}^T z E^{(1)}\delta\kappa_{1x} \\ + \kappa_{1x}^T E^{(1)} z\delta\varepsilon_{0x} + \varepsilon_{1x}^T E^{(1)} z^2 \delta\kappa_{1x} \end{pmatrix} dz \\ + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \varepsilon_{0x}^T E^{(2)}\delta\varepsilon_{0x} + \varepsilon_{0x}^T z E^{(2)}\delta\kappa_{1x} \\ + \kappa_{1x}^T E^{(2)} z\delta\varepsilon_{0x} + \varepsilon_{1x}^T E^{(2)} z^2 \delta\kappa_{1x} \end{pmatrix} dz \end{pmatrix} dS$$

$$+ \int_S \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{0} \left(\gamma_{xz}\left(\frac{5}{12}\frac{E^{(1)}}{\left(1+\nu^{(1)}\right)}\right)\delta\gamma_{xz}\right)dz \\ + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \left(\gamma_{xz}\left(\frac{5}{12}\frac{E^{(2)}}{\left(1+\nu^{(2)}\right)}\right)\delta\gamma_{xz}\right)dz \end{pmatrix} dS$$

$$= \int_S \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{0} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} E^{(1)}\delta W_{0x} + \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} z E^{(1)}\delta\theta_x \\ + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} z E^{(1)}\delta W_{0x} + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} E^{(1)} z^2 \delta\theta_x \end{pmatrix} dz \end{pmatrix} dS$$

$$+ \int_S \begin{pmatrix} \int_{0}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} E^{(2)}\delta U_{0x} + \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} z E^{(2)}\delta\theta_x \\ + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} z E^{(2)}\delta W_{0x} + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} E^{(2)} z^2 \delta\theta_x \end{pmatrix} dz \end{pmatrix} dS$$

$$+ \int_S \begin{pmatrix} \int_{\frac{-h}{2}}^{0} \begin{pmatrix} \left(\theta_x + \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\right)\left(\frac{E^{(1)}}{2\left(1+\nu^{(1)}\right)}\right)\delta\theta_x \\ + \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2}\right)\left(\frac{5E^{(1)}}{12\left(1+\nu^{(1)}\right)}\right)\delta W_{0z} \end{pmatrix} \end{pmatrix} dS$$

$$+ \int_S \begin{pmatrix} \int_{0}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \left(\theta_x + \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\right)\left(\frac{E^{(2)}}{2\left(1+\nu^{(2)}\right)}\right)\delta\theta_x \\ + \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2}\right)\left(\frac{5E^{(2)}}{12\left(1+\nu^{(2)}\right)}\right)\delta W_{0z} \end{pmatrix} \end{pmatrix} dS \quad (8)$$

Công ảo do ảnh hưởng của nền đàn hồi:

$$\delta\Theta_N = \int_\Omega \left(k_w W_{0z}\delta W_{0z} + k_s \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\delta\frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\right)d\Omega \quad (9)$$

trong đó k_w và k_s tương ứng là hai hệ số độ cứng của nền đàn hồi.

Công ảo của lực quán tính:

$$\delta\Theta_I = b\int_L \rho \begin{bmatrix} \left(\ddot{W}_{0x} + z\ddot{\theta}_x\right)\delta\left(W_{0x} + z\theta_x\right) \\ \ddot{W}_{0z}\delta W_{0z} \end{bmatrix} dx$$

$$= b\int_L \rho \begin{bmatrix} \ddot{W}_{0x}\delta W_{0x} + z\ddot{W}_{0x}\delta\theta_x + z\ddot{\theta}_x\delta W_{0x} \\ + z^2\ddot{\theta}\delta\theta_x + \ddot{W}_{0z}\delta W_{0z} \end{bmatrix} dx \quad (10)$$

Công ảo của lực nén tác dụng lên dầm:

$$\delta\Theta_c = b\int_L N_n \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\delta\frac{\partial W_{0z}}{\partial x}dx \quad (11)$$

với N_n là lực nén dọc trục dầm.

Kết hợp các biểu thức (8)-(11) và phương trình (7), ta thu được phương trình cân bằng cho dầm:

$$\delta W_{0x}: \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} E^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} E^{(2)}dz\right)\frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2}$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} zE^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} zE^{(2)}dz\right)\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2}$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} \rho^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \rho^{(2)}dz\right)\ddot{W}_{0x}$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} z\rho^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} z\rho^{(2)}dz\right)\ddot{\theta}_x = 0 \quad (12)$$

$$\delta\theta_x: \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} zE^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} zE^{(2)}dz\right)\frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2}$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} z^2E^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} z^2E^{(2)}dz\right)\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2}$$
$$+ \left(\begin{matrix} \int_{\frac{-h}{2}}^{0} \frac{5E^{(1)}}{12\left(1+\nu^{(1)}\right)}dz \\ + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \frac{5E^{(2)}}{12\left(1+\nu^{(2)}\right)}dz \end{matrix}\right)\left(\theta_x + \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\right) \quad (13)$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} z\rho^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} z\rho^{(2)}dz\right)\ddot{W}_{0x}$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} z^2\rho^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} z^2\rho^{(2)}dz\right)\ddot{\theta}_x = 0$$

$$\delta W_{0z}: \frac{5}{12}\left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} \frac{E^{(1)}}{1+\nu^{(1)}}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \frac{E^{(2)}}{1+\nu^{(2)}}dz\right)\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2}\right)$$
$$+ k_w W_{0z} + k_s \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2} - N_c \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2} \quad (14)$$
$$+ \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} \rho^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \rho^{(2)}dz\right)\ddot{W}_{0z} = 0$$

Hoặc có thể viết ở dạng gọn hơn:

$$H_A \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} + H_B \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + I_{01}\ddot{W}_{0x} + I_{02}\ddot{\theta}_x = 0 \quad (15)$$

$$H_B \frac{\partial^2 W_{0x}}{\partial x^2} + H_C \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + H_D\left(\theta_x + \frac{\partial W_{0z}}{\partial x}\right) + I_{02}\ddot{W}_{0x} + I_{03}\ddot{\theta}_x = 0 \quad (16)$$

$$H_D\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2}\right) + k_w W_{0z} + k_s \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2} - N_c \frac{\partial^2 W_{0z}}{\partial x^2} + I_{01}\ddot{W}_{0z} = 0 \quad (17)$$

với các hệ số:

$$H_A = \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} E^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} E^{(2)}dz\right);\ H_B = \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} zE^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} zE^{(2)}dz\right)$$

$$H_C = \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} z^2E^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} z^2E^{(2)}dz\right);$$

$$H_D = \frac{5}{12}\left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} \frac{E^{(1)}}{1+\nu^{(1)}}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \frac{E^{(2)}}{1+\nu^{(2)}}dz\right)$$

$$\{I_{01}, I_{02}, I_{03}\} = \left(\int_{\frac{-h}{2}}^{0} \left(1, z, z^2\right)E^{(1)}dz + \int_{0}^{\frac{h}{2}} \left(1, z, z^2\right)E^{(2)}dz\right);$$

Giả sử dầm chịu liên kết tựa đơn hai đầu, dạng nghiệm Navier được nghiên cứu này sử dụng:

$$W_{0x} = \sum_{s=1}^{\infty} T_{0x}(t)\cos\left(\frac{s\pi x}{L}\right)$$
$$\theta_x = \sum_{s=1}^{\infty} T_{\theta}(t)\cos\left(\frac{s\pi x}{L}\right) \quad (18)$$
$$W_{0z} = \sum_{s=1}^{\infty} T_{0z}(t)\sin\left(\frac{s\pi x}{L}\right)$$

Từ (15)-(18), ta rút ra:

$$-H_A T_{0x}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 - H_B T_{\theta}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + I_{01}\frac{\partial^2 T_{0x}}{\partial t^2} + I_{02}\frac{\partial^2 T_{\theta}}{\partial t^2} = 0 \quad (19)$$

$$-H_B T_{0x}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + \left[H_D - H_C\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]T_{\theta} + H_D T_{0z}\frac{s\pi}{L} + I_{02}\frac{\partial^2 T_{0x}}{\partial t^2} + I_{03}\frac{\partial^2 T_{\theta}}{\partial t^2} = 0 \quad (20)$$

$$-H_D\left(T_{\theta}\frac{s\pi}{L} + T_{0z}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right) + k_w T_{0z} - k_s T_{0z}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + N_c T_{0z}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + I_{01}\frac{\partial^2 T_{0z}}{\partial t^2} = 0 \quad (21)$$

Do các thành phần quán tính của V_{0x}, I_{02} và I_{03} rất nhỏ so với I_{01} nên người ta có thể bỏ qua, do đó, phương trình trên dẫn đến liên hệ:

$$H_A\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 T_{0x} + H_B\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 T_{\theta} = 0 \quad (22)$$

$$-H_B\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 T_{0x} + \left[H_D - H_C\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]T_{\theta} + H_D\frac{s\pi}{L}T_{0z} = 0 \quad (23)$$

$$-H_D\frac{s\pi}{L}T_{\theta} + \left[-H_D\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + k_w - k_s T_{0z}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + N_c\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]T_{0z} + I_{01}\frac{\partial^2 T_{0z}}{\partial t^2} = 0 \quad (24)$$

Từ hai phương trình (22)-(24), ta có

$$T_{\theta} = K_{w\theta}T_{0z}$$

với:

$$K_{w\theta} = -\frac{H_D H_A\left(\frac{s\pi}{L}\right)^3}{\left[H_B^2\left(\frac{s\pi}{L}\right)^4 + \left[H_D - H_C\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]H_A\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]} \quad (25)$$

thế (26) vào phương trình (25), ta được:

$$\left[-H_D\frac{s\pi}{L}K_{w\theta} + \left[-H_D\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + k_w - k_s T_{0z}\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + N_c\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]\right. + I_{01}\frac{\partial^2 T_{0z}}{\partial t^2} = 0 \quad (26)$$

Phương trình (26), ta sẽ thu được tần số dao động riêng thứ s của dầm nhiều lớp trên nền đàn hồi hai hệ số chịu tác dụng của lực nén dọc trục:

$$\Omega_s^2 = \frac{\left[-H_D\frac{s\pi}{L}K_{w\theta} + \left[-H_D\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + k_w - k_s\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2 + N_c\left(\frac{s\pi}{L}\right)^2\right]\right]}{I_{01}} \quad (27)$$

3. TÍNH TOÁN SỐ

3.1. So sánh để chứng tỏ độ tin cậy

Xét dầm có chiều dài *L*, chiều cao *h*. Vật liệu làm dầm có *E* = 380 GPa, ρ = 3960 kg/m³, vật liệu nhôm oxit Al_2O_3 theo [6], dầm tựa trên nền đàn hồi hai hệ số với công thức chuẩn hóa $\bar{K}_w = \frac{k_w L^4}{EI}, \bar{K}_s = \frac{k_s L^2}{EI\pi^2}$. Bảng 1 so sánh tần số không thứ nguyên đầu tiên $\omega_{ktn} = \sqrt{\Omega L^2 \sqrt{\frac{12\rho}{E.h^2}}}$ với kết quả tính toán bằng phương pháp cầu phương vi phân [6] và phương pháp giải tích [7]. Bằng việc nhìn vào kết quả so sánh trong Bảng 1, ta có thể nhận thấy chúng tương đồng nhau, điều này chứng minh sự tin cậy của phương pháp nghiên cứu của bài báo này.

Bảng 1. So sánh tần số không thứ nguyên đầu tiên của dầm trên nền đàn hồi hai hệ số

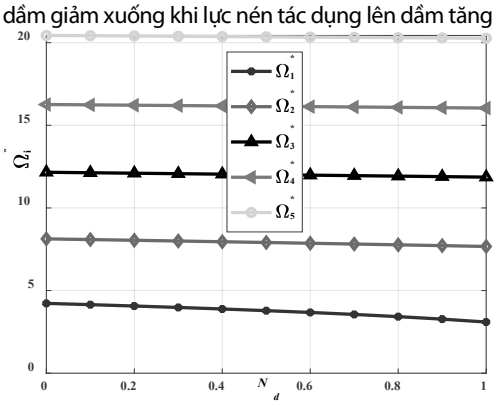
$(\bar{K}_w, \bar{K}_s)$	(0, 0)	(0, 2.5)	(0, 1)	(10^2, 0)	(10^2, 2.5)	(10^2, 1)
[6]	3.14	4.29	3.73	3.74	4.58	4.14
[7]	3.14	4.29	3.73	3.74	4.58	4.14
Bài báo	3.14	4.29	3.73	3.74	4.58	4.14

3.2. Tính toán số và thảo luận

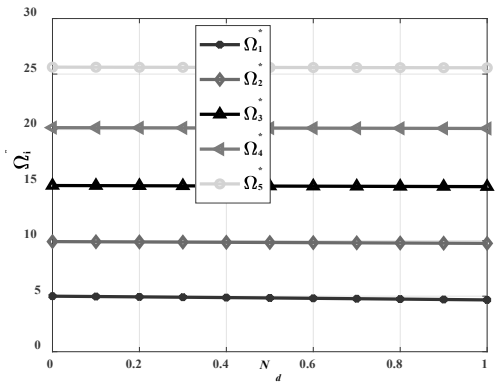
Trên cơ sở các công thức tính toán đã lập ở mục 2, phần này đưa ra các số liệu tính toán cụ thể cho bài toán dao động riêng của dầm hai lớp chịu tải trọng nén dọc trục. Thông số hình học và vật liệu của dầm bao gồm chiều dài *L* = 2 m, E_0 = 70 GPa, $\nu_0 = 0.3$, $\rho_0 = 2700$ kg/m³, tải nén dọc trục dầm là $N_c = N_d.10^5$ N/m. Nền đàn hồi có các tham số độ cứng $k_w^* = k_w \frac{12L^4}{E_0 h_0^3}$; $k_s^* = k_s \frac{12L^2}{E_0 h_0^3}$. Thông số khảo sát là tần số dao động riêng thứ i của dầm được chuẩn hóa theo công thức: $\Omega_i^* = \Omega(i) L^2 \sqrt{\frac{12\rho}{E.h_0^2}}$, với $h_0 = L/50$.

- Ảnh hưởng của lực lực nén tác dụng lên dầm:

Để xem xét đáp ứng dao động riêng của dầm trong trường hợp tải trọng nén nhận giá trị khác nhau, tiến hành thay đổi độ lớn của N_d từ 1 đến 10, kết quả tính toán năm tần số dao động riêng đầu tiên của dầm được chỉ ra như trên Hình 2. Khi lực nén tác dụng lên dầm tăng lên thì tần số dao động riêng của dầm giảm xuống, điều này là do khi lực nén có giá trị càng lớn thì năng lượng của dầm càng giảm, do đó độ cứng tổng thể của kết cấu giảm xuống. Do đó tần số dao động của dầm giảm xuống khi lực nén tác dụng lên dầm tăng lên.



a. *L*/*h*=30

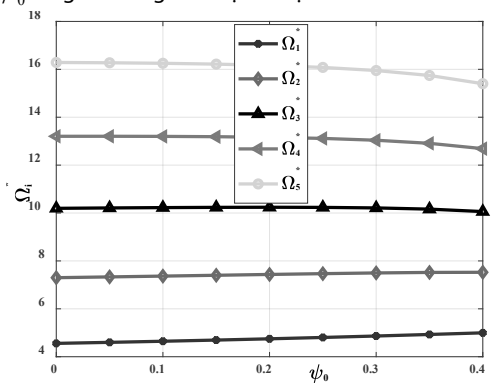


b. *L*/*h*=20

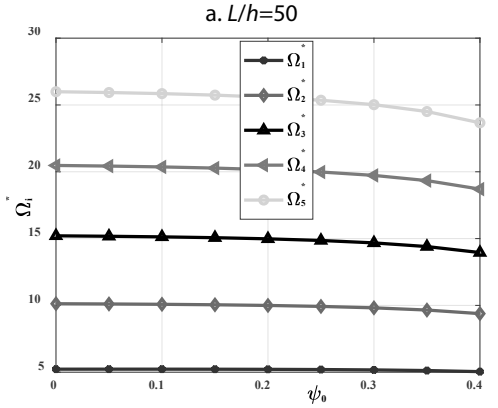
Hình 2. Năm tần số đầu tiên của dầm phụ thuộc vào lực nén N_d, k_w^* =10, k_s^* =2, k=0.4, ψ_0 =0.3.

- Ảnh hưởng của thể tích lỗ rỗng ψ_0:

Tăng dần thể tích lỗ rỗng sao cho tham số ψ_0 biến đổi từ 0 đến 0.4, kết quả tính toán năm tần số dao động riêng đầu tiên của dầm nhiều lớp được vẽ như trên Hình 3. Ta thấy rằng khi tham số ψ_0 có giá trị càng lớn thì tỷ lệ lỗ rỗng trong vật liệu của dầm càng lớn, tần số dao động riêng của dầm composite càng giảm. Tuy nhiên, tần số càng cao thì mức độ giảm của tần số khi tham số ψ_0 tăng lên càng thể hiện rõ rệt.



a. *L*/*h*=50



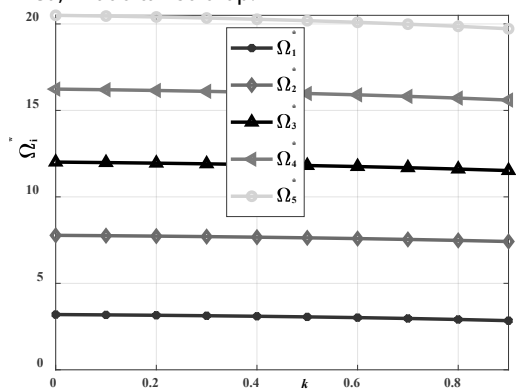
b. *L*/*h*=20

Hình 3. Năm tần số dao động riêng đầu tiên của dầm phụ thuộc vào thể tích lỗ rỗng ψ_0, N_d=1, k_w^* =20, k_s^* =5, k=0.9.

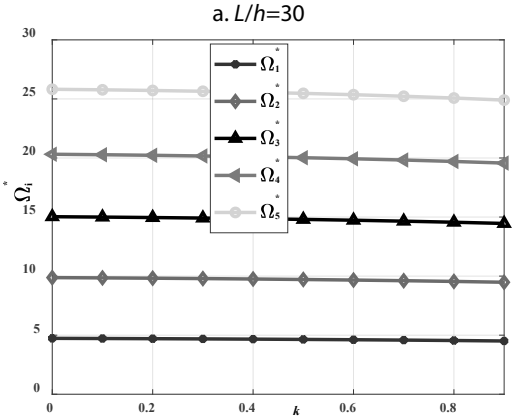
- Ảnh hưởng của tham số *k*:

Hình 4 thể hiện kết quả tính toán năm tần số dao động riêng đầu tiên của dầm nhiều lớp phụ thuộc vào tham số *k* ứng với hai giá trị khác nhau của tỷ lệ *L*/*h*. Khi tăng giá trị của tham số *k* thì

tần số dao động của dầm giảm xuống, điều này là do tham số *k* càng tăng thì tỷ lệ lỗ rỗng trong dầm càng tăng, do đó dầm trở nên mềm hơn. Tuy nhiên, sự thay đổi của tần số đối với tham số *k* không nhiều, nhất ở tần số thấp.



a. *L/h*=30



b. *L/h*=20

Hình 4. Năm tần số dao động riêng đầu tiên của dầm phụ thuộc tham số phân bố lỗ rỗng k, N_d= 1, k_w^* =20, k_s^* =5, k=0.4, ψ_0 =0.3

Từ các kết quả khảo sát trên, có thể rút ra một số nhận định quan trọng cho thiết kế: Lực nén dọc trục có ảnh hưởng đáng kể nhất đến tần số dao động riêng, đặc biệt ở các mode thấp, do đó khi thiết kế dầm chịu nén trên nền đàn hồi cần ưu tiên kiểm tra tần số mode 1. Thể tích lỗ rỗng ψ_0 ảnh hưởng mạnh hơn ở các mode cao, trong khi tham số phân bố k có ảnh hưởng tương đối nhỏ, cho thấy tổng thể tích lỗ rỗng quan trọng hơn cách phân bố lỗ rỗng. (Dầm dày (L/h = 20) có tần số chuẩn hóa cao hơn dầm mỏng (L/h = 50) do ảnh hưởng của biến dạng cắt.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất lời giải dạng Navier để nghiên cứu dao động riêng của dầm hai lớp tựa trên nền đàn hồi, vật liệu có lỗ rỗng vi mô và chịu tải trọng nén dọc theo trục dầm. Các công thức tính toán được tìm ra trên cơ sở lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất Timoshenko và được kiểm chứng với các kết quả tính bằng cả phương pháp gần đúng và phương pháp giải tích để khẳng định tính đúng đắn của lý thuyết đã thiết lập. Nghiên cứu này cũng chỉ ra các tính toán số và kèm theo các thảo luận cụ thể đối với tham số hình học và vật liệu của dầm, của lực nén nhằm giúp các nhà khoa học hiểu được quy luật của các đáp ứng tần số, từ đó hiểu rõ hơn cơ chế và quy luật đáp ứng của dầm nhiều lớp trong thực tế. Đây cũng là cơ sở khoa học giúp thiết kế hiệu quả các kết cấu dạng dầm trong kỹ thuật xây dựng một cách có hiệu quả cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phạm Thị Ba Liên, Dao động tự do của dầm sandwich cơ tính biến thiên có lỗ rỗng trên nền đàn hồi sử dụng lý thuyết biến dạng cắt lượng giác, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 74(8), 946-961, 2023.

[2] Hương Quý Trường; Đặng Xuân Hùng; Trần Minh Tú, Phân tích dao động riêng dầm sandwich FGM xốp với điều kiện biên khác nhau bằng phương pháp Ritz, Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng, 15(5V), 15-27, 2021.

[3] Chen, D.; Yang, J.; Kitipornchai, S., Free and forced vibrations of shear deformable functionally graded porous beams, International Journal of Mechanical Sciences, 108-109, 14-22, 2016.

[4] Charles, C.I., Static Flexure of First Order Shear Deformable Thick Beam Resting on Two-Parameter Elastic Foundation -Equilibrium Formulation and Closed Form Solutions, NIPES - Journal of Science and Technology Research, 7(1), 235-254, 2025.

[5] Zghal, S.; Ataoui, D.; Dammak, F., Static bending analysis of beams made of functionally graded porous materials, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 50(3), 1012-1029, 2022.

[6] Chen, W.Q.; Lü, C.F.; Bian, Z.G., A mixed method for bending and free vibration of beams resting on a Pasternak elastic foundation, Applied Mathematical Modelling, 28(10), 877-890, 2004, doi:10.1016/j.apm.2004.04.001.

[7] Dao Van Doan; Do Van Thom; Dao Van Vuong, Analytical Solution to Investigate the Vibrational Response of a Sandwich Nanobeam, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 14, 143, 2026, doi:10.1007/s42417-026-02336-8.

■Ngày nhận bài: 07/4/2026 ■Ngày sửa bài: 17/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Ảnh hưởng của bề rộng tấm sợi các-bon gia cường đến ứng xử bám dính của tấm sợi các-bon với bê tông

Effect of CFRP sheet width on the bond behavior of CFRP-concrete interfaces

> TS TRẦN VĂN PHÚC
Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
Email: phuc.tranvan@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của bề rộng tấm gia cường CFRP đến ứng xử bám dính của tấm CFRP với bê tông dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên ba mẫu với bề rộng tấm CFRP thay đổi lần lượt là 50 mm, 100 mm và 150 mm thông qua thí nghiệm kéo trượt một mặt. Kết quả thực nghiệm cho thấy bề rộng tấm CFRP ảnh hưởng rõ nét đến dạng phá hoại của tấm CFRP, theo đó, tấm có xu hướng bị chẻ thành các thớ nhỏ với tấm có bề rộng từ 100 mm đến 150 mm. Hiện tượng bong tách của tấm CFRP xuất hiện sớm với các mẫu có bề rộng tấm nhỏ. Bề rộng của tấm CFRP ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng lớn nhất, cường độ bám dính và độ trượt của tấm và ảnh hưởng này có xu hướng giảm dần theo sự gia tăng của bề rộng tấm. Việc tăng bề rộng tấm CFRP còn gây nên hiện tượng phân bố không đều của biến dạng tấm theo phương ngang của tấm với biến dạng của các thớ biên có xu hướng lớn hơn so với các thớ giữa.

Từ khóa: Cường độ bám dính; biến dạng; tấm CFRP; bề rộng tấm CFRP; thí nghiệm kéo trượt.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the influence of CFRP sheet width on the bonding behavior of CFRP sheets to concrete under static loading. The experimental program was conducted on three samples with varying CFRP sheet widths of 50 mm, 100 mm, and 150 mm using a single pull-out tensile test. Experimental results show that the CFRP sheet width significantly affects the failure mode of the CFRP sheets; CFRP sheets with widths from 100 mm to 150 mm tend to split into smaller fibers. Delamination of the CFRP sheets occurs early in samples with smaller sheet widths. The width of the CFRP sheets significantly influences the maximum strain, bond strength, and slip of the CFRP sheets, and this influence tends to decrease with increasing sheet width. Increasing the width of the CFRP sheet also causes an uneven distribution of sheet deformation in the horizontal direction, with strain at the edges tending to be greater than that of the middle fibers.

Keywords: Bond strength; Strain; CFRP sheet; CFRP sheet width; Pull-out tensile test.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khả năng bám dính của tấm CFRP với bê tông là yếu tố quan trọng, ảnh hưởng đến ứng xử kết cấu của cấu kiện bê tông được gia cường bằng tấm CFRP (Phan-Vu et al. 2021, Widanage et al. 2021 and Kim et al. 2022). Nhiều nghiên cứu đều có chung quan điểm rằng hiệu quả gia cường của vật liệu FRP phụ thuộc rất lớn vào khả năng bám dính của vật liệu này với kết cấu được gia cường; trong đó, tỉ số bề rộng tấm dán FRP và bề rộng mẫu bê tông là một yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử bám dính của tấm CFRP (Chen and Teng, 2001; Subramaniam et al. 2007; Lin et al., 2017; Neto et al. 2016). Tuy nhiên, cho đến nay, chỉ có một số rất ít nghiên cứu tập trung vào tác động của bề rộng dán của tấm CFRP (Neto et al. 2016). Tấm gia cường như tấm CFRP thường là loại tấm trực hướng (theo phương sợi) nên theo phương còn lại, lưới sợi thường có hiện tượng bị tách trong quá trình thi công và làm việc. Khi bề rộng tấm CFRP lớn, xác suất xuất hiện của hiện tượng này càng cao và nó có thể ảnh hưởng bất lợi đến hiệu quả làm việc của tấm CFRP.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của bề rộng tấm polymer cốt sợi các-bon (CFRP) đến ứng xử bám dính của tấm CFRP với bê tông dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên ba mẫu với bề rộng tấm CFRP thay đổi lần lượt là 50 mm, 100 mm và 150 mm. Thông qua các kết quả thực nghiệm thu được, ảnh hưởng của bề rộng tấm CFRP đến các đại lượng như cường độ bám dính, độ trượt, biến dạng tấm CFRP theo phương dọc và ngang được phân tích.

2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Các mẫu thí nghiệm dùng bê tông thương phẩm với loại cấp phối như trong Bảng 1. Cường độ chịu nén dọc trục và kéo chẻ của bê tông

dầm được lấy trung bình trên kết quả thí nghiệm của sáu mẫu lập phương 150×150×150 mm ở tuổi 28 ngày theo tiêu chuẩn TCVN 10303:2014 và TCVN 8862:2011, lần lượt là 45.4 MPa và 3.4 MPa. Vải sợi các-bon sử dụng trong thí nghiệm là loại trực hướng. Các đặc trưng cơ học của vải sợi các-bon và keo nền epoxy được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 1. Cấp phối vật liệu cho 1 m^3 bê tông

Xi măng (kg)	Nước (l)	Cát sông (kg)	Cát nghiền (kg)	Đá (kg)	Phụ gia (ml)	Độ sụt (mm)
430	180	504	216	1057	MIGHTY SR (4730)	120 ± 20

Bảng 2. Thông số cơ học của vải sợi các-bon và keo nền epoxy

Vải sợi các-bon				Keo Epoxy*	
E_f (GPa)	f_{ffu} (MPa)	ε_{ffu} (%)	t_f^* (mm)	f_a (MPa)	E_a (GPa)
230	4744	2.03	0.166	60	3-3.5

Ghi chú: E_f là mô-đun đàn hồi của vải sợi các-bon, GPa; f_{ffu} là cường độ chịu kéo của vải sợi các-bon, MPa; ε_{ffu} là độ giãn dài tới đứt của vải sợi các-bon, %; t_f là chiều dày của vải sợi các-bon, mm; f_a là cường độ chịu kéo của keo epoxy, MPa; E_a là mô-đun đàn hồi của keo epoxy, GPa.

**Giá trị được cung cấp bởi nhà sản xuất.*

2.2. Mẫu thí nghiệm kéo trượt một mặt

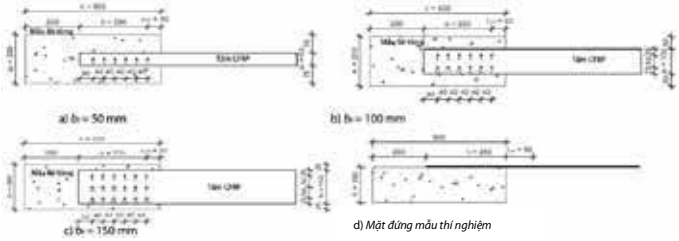
Các mẫu bê tông có kích thước dài l_c = 500 mm, rộng b_c = 200 mm, và cao h_c =150 mm. Tấm CFRP được dán lên bề rộng (b_c) của mẫu bê tông với chiều dài dán của tấm là l_b = 250 mm và bề rộng dán của tấm lần lượt là 50 mm, 100 mm, và 150 mm. Thông số hình học cụ thể của mẫu được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Thông số hình học của mẫu thí nghiệm

Ký hiệu mẫu	Mẫu bê tông	Tấm CFRP	
	l_c x b_c x h_c	Chiều dài dán, l_b	Bề rộng tấm, b_f
	(mm)	(mm)	(mm)
BR-50	500x200x150	250	50
BR-100		250	100
BR-150		250	150

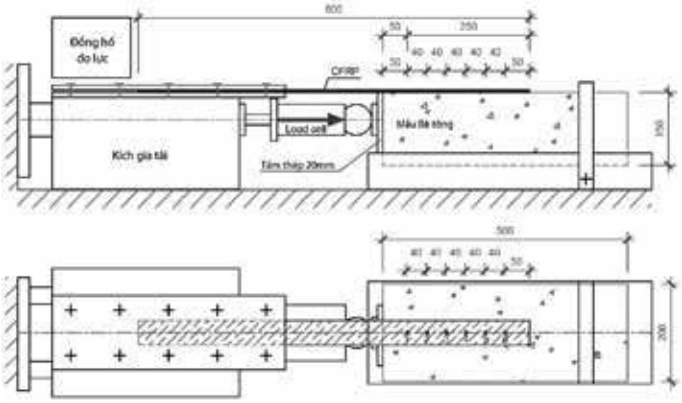
Bê tông được đổ theo phương đứng và đầm dùi điện được sử dụng để làm đều mẫu. Sau khi đổ 1 giờ, bao bố tẩm nước được phủ lên trên bề mặt mẫu để tránh nước bốc hơi gây nứt mẫu. Các mẫu được bảo dưỡng đảm bảo đủ độ ẩm để không bị co ngót gây nứt. Các mẫu được tưới nước 6 giờ/ngày, liên tục trong 6 ngày. Các mẫu được tháo cốp pha sau khi được trên 28 ngày tuổi. Các mẫu có hình thức tốt được lựa chọn để mài gia công bằng phẳng, không có khuyết tật, và được lau sạch bụi trước khi dán tấm gia cường. Sau khi dán tấm, các mẫu được bảo quản trong điều kiện phòng thí nghiệm (nhiệt độ trung bình 28°C và độ ẩm 75%) tối thiểu 7 ngày trước khi được tiến hành thí nghiệm.

Các cảm biến đo biến dạng của tấm CFRP được lắp đặt trên bề mặt tấm CFRP. Cụ thể, 06 cảm biến (SG) thẳng hàng cách nhau 40 mm được lắp đặt cho tấm có bề rộng b_f = 50 mm; 12 cảm biến (SG) được bố trí thành hai hàng, cách nhau 40 mm được lắp đặt cho tấm có bề rộng b_f = 100 mm; và 18 cảm biến (SG) được bố trí thành ba hàng, cách nhau 40 mm được lắp đặt cho tấm có bề rộng b_f = 150 mm (Hình 1).



Hình 1. Kích thước hình học của mẫu thí nghiệm và sơ đồ bố trí cảm biến (SG)

2.3. Sơ đồ thí nghiệm

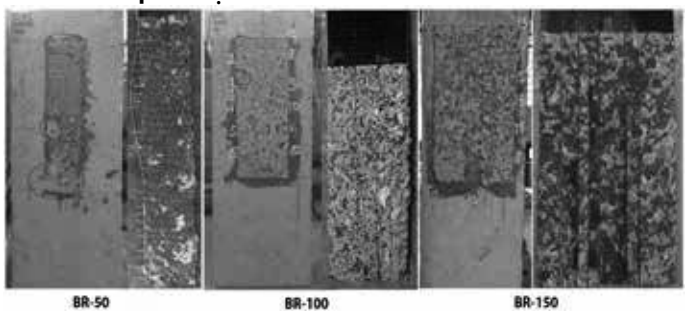


Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm

Các mẫu được thí nghiệm theo phương pháp kéo trượt một mặt (Hình 2). Phương pháp thực nghiệm và quy trình gia tải được áp dụng theo các tiêu chuẩn thí nghiệm tấm FRP theo ASTM D3039/D3039M-17 (2017). Quá trình gia tải được điều khiển theo chuyển vị với tốc độ không đổi bằng 0.03 mm/s cho đến khi tấm bị bong tách hoàn toàn khỏi mẫu bê tông. Toàn bộ quy trình gia tải và ghi nhận dữ liệu lực đều được lập trình và tự động hóa.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kiểu phá hoại

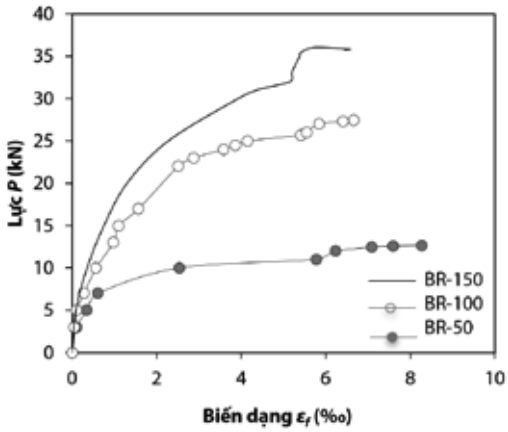


Hình 3. Kiểu phá hoại của các mẫu

Các mẫu đều bị phá hoại do bong tách tấm CFRP Hình 3. Đối với các mẫu có bề rộng tấm bằng 50 mm, thời gian tính từ khi tấm bắt đầu xuất hiện bong tách đến khi bị bong tách hoàn toàn tương đối ngắn. Sự mất bám dính lan truyền rất nhanh đến gần vị trí của SG6, cách mép cuối tấm khoảng 4-5 cm, thì bị tách đột ngột kèm tiếng nổ. Các mẫu có tấm CFRP với bề rộng càng lớn, sự bong tách phát triển càng chậm; sự mất bám dính xảy ra dần từ mép đầu dán tấm đến khoảng hàng SG thứ tư, lực kéo đạt trên 80% P_{max} sau đó tăng nhanh, phá hoại bong tách hoàn toàn gần như tức thời, kèm tiếng nổ lớn. Tương tự như mẫu có bề rộng tấm CFRP bằng 50 mm, bề mặt bê tông các mẫu có bề rộng tấm bằng 100 mm và 150 mm bị phá hoại nhiều tại vùng gần cuối tấm; tuy nhiên, xét về tổng thể, bề mặt bê tông bị phá hoại tương đối đều hơn (do quá trình bong tách ban đầu xảy ra chậm, diện tích bề mặt và cường độ của keo và bê tông đều không bị sụt giảm đột ngột).

3.2. Quan hệ lực và biến dạng của tấm CFRP

Xu hướng chung của quan hệ lực - biến dạng các nhóm mẫu là khi bề rộng tấm CFRP tăng thì lực kéo lớn nhất (P_{max}) tăng, nhưng biến dạng lớn nhất giảm (Bảng 4 và Hình 4). Biến dạng lớn nhất được tìm thấy tại vùng gần điểm đặt tải và biến dạng nhỏ dần đến vùng mép cuối tấm. Mẫu có bề rộng tấm CFRP lớn có lực kéo P_{max} lớn do diện tích bám dính lớn; cụ thể, P_{max} của các mẫu có b_f = 100 mm và 150 mm tăng lần lượt là 61% và 135.5% so với của mẫu có b_f = 50 mm.



Hình 4. Quan hệ lực và biến dạng của tấm CFRP của các mẫu

Biến dạng lớn nhất của tấm CFRP có xu hướng giảm khi bề rộng tấm tăng Hình 4. Biến dạng của tấm có bề rộng bằng 50 mm tăng nhanh hơn đáng kể so với của các tấm có bề rộng lớn hơn. Biến dạng của tấm CFRP suy giảm mạnh khi bề rộng tấm tăng từ 50 mm đến 100 mm; tuy nhiên, mức độ chênh lệch biến dạng của mẫu có bề rộng tấm bằng 100 mm so với của mẫu có bề rộng tấm bằng 150 mm được thu hẹp dần. Biến dạng lớn nhất của tấm CFRP của mẫu có bề rộng tấm bằng 100 mm và 150 mm giảm lần lượt là 21% và 24% so với của mẫu có bề rộng tấm bằng 50 mm.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả thực nghiệm

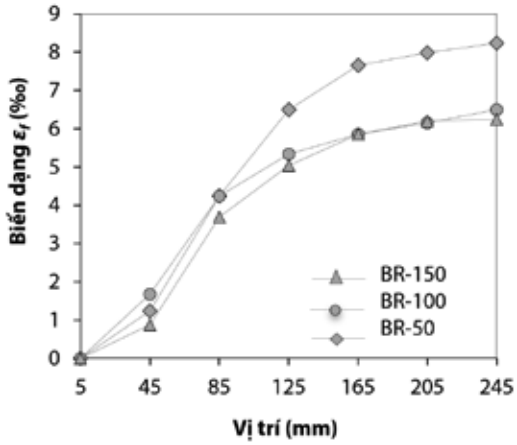
Mẫu	P_{max} kN	$\varepsilon_{f,max}$ ‰	$\tau_{f,max}$ MPa	s_p mm	Kiểu phá hoại
BR-50	14.5	8.13	4.79	0.129	Bong tách
BR-100	20.7	6.36	4.66	0.118	Bong tách
BR-150	35.4	6.19	4.48	0.109	Bong tách

Ghi chú: P_{max} là lực kéo lớn nhất, kN; $\varepsilon_{f,max}$ là biến dạng lớn nhất của tấm CFRP, ‰; $\tau_{f,max}$ là cường độ bám dính nhất trong tấm; s_p là độ trượt tương ứng với $\tau_{f,max}$, mm.

3.3. Sự phân bố biến dạng trong tấm

(a) Phân bố theo chiều dọc tấm

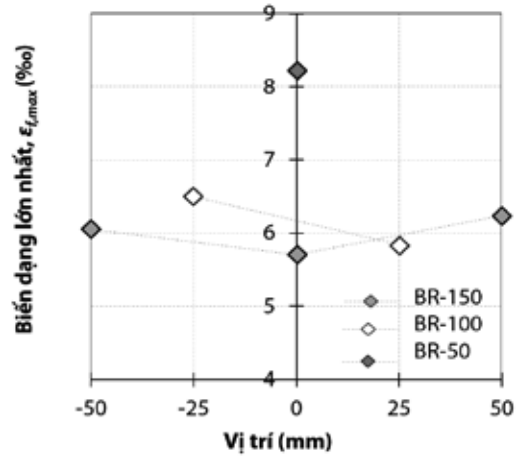
Hình 5 biểu diễn mối quan hệ giữa biến dạng của tấm CFRP ε_f (‰) và vị trí đặt các cảm biến theo chiều dọc tấm. Các vị trí này được lấy so với điểm cách mép ở vùng cuối tấm CFRP một đoạn là 5mm. Dọc theo chiều dài của tấm CFRP, biến dạng của tấm đạt giá trị lớn nhất ở vùng đầu tấm, gần với điểm tác dụng lực và giảm dần đến vùng cuối tấm Hình 5. Đối với các mẫu có bề rộng 50 mm, ở các cấp tải nhỏ hơn 70% P_{max}, tấm CFRP có xu hướng làm việc cục bộ tại vùng đầu tấm, gần với điểm tác dụng lực (vị trí của SG1), biến dạng của các vùng khác trong tấm hầu như không đáng kể. Khi lực tác dụng đạt trên 70% P_{max}, tấm bắt đầu xuất hiện sự bong tách cục bộ tại vùng đầu tấm làm biến dạng tại đây tăng đột ngột; ở các cấp tải kế tiếp, biến dạng của tấm ở vùng này tăng chậm lại đồng thời biến dạng tại các vùng còn lại tăng nhanh theo hướng về vùng cuối tấm. Đối với các mẫu có bề rộng 100 mm và 150 mm, quá trình phát triển biến dạng của tấm cũng có xu hướng tương tự, tuy nhiên, hiện tượng bong tách cục bộ của tấm xuất hiện chậm hơn, ở cấp tải xấp xỉ 80-90% P_{max}. Hiện tượng biến dạng của tấm đạt giá trị lớn nhất tại vùng đầu tấm, gần với điểm tác dụng lực là do vùng này là nơi tiếp nhận lực tác dụng đầu tiên và nhờ vào sự bám dính tốt của tấm với bê tông trong suốt chiều dài dán tấm làm cho tấm phát huy tốt nhất khả năng chịu kéo, biến dạng tấm tại vùng này vì thế trở nên lớn nhất. Ở các cấp tải đủ lớn, biến dạng tấm ở vùng này tăng mạnh và hiện tượng bong tách tại đây bắt đầu xuất hiện; lực kéo truyền trực tiếp vào các vùng phía sau của tấm (vùng chưa bị bong tách) làm cho biến dạng tấm ở các vùng này tăng lên; tuy nhiên, do tấm đã bị bong tách một phần, chiều dài bám dính đã bị suy giảm đáng kể làm cho liên kết bám dính giữa tấm và bê tông không còn tốt như ban đầu. Tấm bắt đầu bị trượt nhiều hơn, và vì vậy, khả năng truyền ứng suất kéo trong tấm vào bê tông bị suy giảm làm cho biến dạng tấm trong vùng này không lớn như vùng đầu tấm.



Hình 5. Phân bố biến dạng dọc của tấm CFRP của các mẫu

(b) Phân bố theo chiều ngang tấm

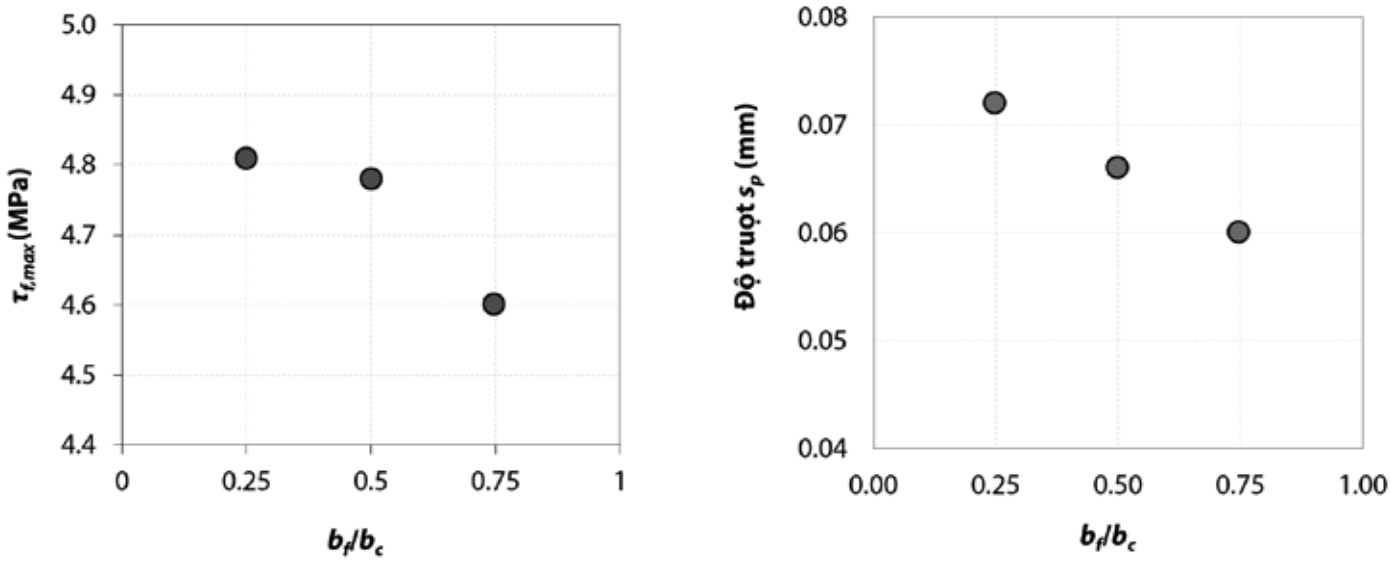
Hình 6 biểu diễn mối quan hệ giữa biến dạng lớn nhất của tấm CFRP $\varepsilon_{f,max}$ (‰) và vị trí đặt các cảm biến theo chiều ngang tấm. Các vị trí này được lấy so với trục chính giữa theo chiều ngang tấm CFRP. Biến dạng của tấm phân bố theo phương ngang tấm (phương bề rộng tấm) không đều; theo đó, biến dạng tại các vị trí ngoài biên có xu hướng lớn hơn so với vị trí giữa Hình 6. Hiện tượng chênh lệch biến dạng này là nguyên nhân dẫn đến hiện tượng tấm CFRP bị tách (chẻ) ra thành các dải nhỏ khi ứng suất kéo đủ lớn, gây nên hiện tượng biến dạng cục bộ và làm giảm khả năng biến dạng tổng thể của tấm. Mẫu có bề rộng tấm càng lớn, hiện tượng phân bố biến dạng không đều càng rõ nét và tấm CFRP càng bị chẻ thành nhiều dải nhỏ.



Hình 6. Biến dạng dọc lớn nhất của tấm CFRP theo bề rộng tấm của các mẫu

3.4. Cường độ bám dính lớn nhất và độ trượt tương ứng

Cường độ bám dính lớn nhất $\tau_{f,max}$ và độ trượt tương ứng s_p của tấm CFRP với bê tông được xác định theo Ferracuti et al. (2007) dựa trên phương pháp phân phối biến dạng dọc theo chiều dài dán tấm. Cường độ bám dính lớn nhất và độ trượt tương ứng của tấm CFRP có xu hướng giảm theo sự gia tăng của bề rộng tấm (Hình 7). Theo đó, bề rộng tấm càng lớn, tức tỉ số bề rộng tấm và bề rộng mẫu thí nghiệm b_f/b_c càng tiến dần đến 1.0, cường độ bám lớn nhất $\tau_{f,max}$ giảm lần lượt là 4.7% và 13.7%; và mức giảm của độ trượt tương ứng s_p là 31.5% và 30.3%.



Hình 7. Sự thay đổi của cường độ bám dính của tấm CFRP theo tỉ số bề rộng tấm CFRP và bề rộng mẫu bê tông, b_f/b_c

4. KẾT LUẬN

Bài báo khảo sát thực nghiệm ảnh hưởng của bề rộng tấm gia cường CFRP đến ứng xử bám dính của tấm CFRP với bê tông dưới tác dụng của tải trọng tĩnh dựa trên chương trình thực nghiệm của ba mẫu với bề rộng tấm CFRP thay đổi lần lượt là 50 mm, 100 mm và 150 mm. Từ các kết quả thu được, một số kết luận có thể rút ra như sau:

Bề rộng tấm CFRP có ảnh hưởng rõ nét đến dạng phá hoại của tấm CFRP. Mẫu có bề rộng tấm CFRP nhỏ (= 50 mm), hiện tượng bong tách xuất hiện sớm khi lực kéo đạt xấp xỉ 70% lực kéo lớn nhất. Mẫu có bề rộng tấm CFRP từ 100 mm trở lên, hiện tượng bong tách xuất hiện khi lực kéo đã đạt 80-90% lực kéo lớn nhất và phát triển chậm đến khoảng giữa chiều dài dán tấm thì bị phá hoại đột ngột.

Bề rộng của tấm CFRP có ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng lớn nhất, cường độ bám dính và độ trượt của tấm. Các giá trị này có xu hướng giảm dần theo sự gia tăng của bề rộng tấm.

Việc tăng bề rộng tấm CFRP trong các mẫu thực nghiệm còn gây nên hiện tượng phân bố không đều của biến dạng tấm theo phương ngang của tấm; theo đó, biến dạng của các thớ biên có xu hướng lớn hơn so với các thớ giữa. Đây có thể là nguyên nhân chính gây nên kiểu phá hoại chẻ tấm, làm cho tấm làm việc không đều từ đó làm giảm khả năng bám dính của tấm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems (ACI 440.2R-17). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017.

[2] ASTM D3039/D3039M. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM Committee, West Conshohocken, PA, 2017.

[3] Widanage, C., Gamage, J.C.P.H., De Silva, G.I.P. "Bond characteristics of CFRP strengthened concrete members bonded using Modified Engineered Cementitious Composite". Case Studies in Construction Materials, Vol. 15, e00766, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00766

[4] Chen, J.F., Teng, J.G. "A shear strength model for FRP strengthened RC beams". Proceedings of FRPRCS-5 Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, pp. 205-214, 2001.

[5] Ferracuti, B., Savoia, M., Mazzotti, C. "Interface law for FRP-concrete delamination". Composite Structures, Vol. 80, pp. 523-531, 2007. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.07.001

[6] Kim, J., Jeong, S., Kim, H., Kim, Y., Park, S. "Bond Strength Properties of GFRP and CFRP according to Concrete Strength". Applied Sciences, Vol. 12, No. 20, 10611, 2022. https://doi.org/10.3390/app122010611

[7] Lin, J.P., Wu, Y.F., Smith, S.T. "Width factor for externally bonded FRP-to-concrete joints". Construction and Building Materials, Vol. 155, pp. 818–829, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.083

[8] Neto, P., Alfaiate, J., Vinagre, J. "Assessment of the dependence of CFRP-concrete behaviour on the width of the bonded materials". Composites Part B: Engineering, Vol. 91, pp. 448-457, 2016. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.024

[9] Phan-Vu, P., Tran, D.T., Pham, T.M., Dang, T.D., Ngo-Huu, C., Nguyen-Minh, L. "Distinguished bond behaviour of CFRP sheets in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests". Engineering Structures, Vol. 234, 111794, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111794

[10] Subramaniam, K.V., Carloni, C., Nobile, L. "Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete". Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, No. 4, pp. 578-594, 2007. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.08.002

[11] TCVN 8862:2011. Standard test method for splitting tensile strength of aggregate material bonded by adhesive binders. Ministry of Science and Technology, Vietnam, 2011.

[12] TCVN 10303:2014. Concrete - Control and assessment of compressive strength. Ministry of Science and Technology, Vietnam, 2014.

■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP

Study of the flexural behavior of high-strength concrete GFRP reinforced beams

> KS HUỲNH CHÍ HIẾU[1], TS NGÔ VĂN THỨC[2,*], THS ĐINH HOÀI LUÂN[2], THS NGUYỄN LÊ TÀI[2], THS BÙI THỊ NGỌC HIỀN[3]
[1]Phòng Kinh tế, Hạ tầng và Đô thị, phường Tân Ngãi, tỉnh Vĩnh Long
[2]Trường Đại học Xây dựng Miền Tây; [*]Email: ngovanthuc@mtu.edu.vn
[3]Công ty TNHH Sing Swee Bee Việt Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP nhằm đánh giá khả năng thay thế cốt thép truyền thống. Nghiên cứu đã chế tạo các mẫu dầm và thí nghiệm uốn bốn điểm để xác định quan hệ tải trọng-chuyển vị, ứng suất-biến dạng và dạng phá hoại của cấu kiện. Kết quả cho thấy dầm có khả năng chịu lực tốt, tuy nhiên mô đun đàn hồi của GFRP thấp hơn thép nên chuyển vị và bề rộng vết nứt lớn hơn. Dầm có ứng xử đàn hồi tuyến tính đến phá hoại, không chảy dẻo như cốt thép, dạng phá hoại chủ yếu là phá hoại giòn. Nghiên cứu giúp cung cấp cơ sở thực nghiệm và làm rõ cơ chế làm việc của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP, khẳng định tiềm năng ứng dụng vật liệu này trong công trình xây dựng.

Từ khóa: Bê tông cường độ cao; polyme sợi thủy tinh (GFRP); ứng xử uốn; nứt.

ABSTRACT

This study focuses on the flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with GFRP bars, aiming to evaluate their potential as a replacement for conventional steel reinforcement. Beam specimens were fabricated and tested under four-point bending to determine load-deflection relationships, stress-strain responses, and failure modes. The results indicate that the beams exhibit good load-carrying capacity; however, due to GFRP's lower elastic modulus compared to steel, larger deflections and crack widths were observed. The beams demonstrate linear elastic behavior up to failure, without yielding as in steel-reinforced beams, and the predominant failure mode is brittle. This study provides experimental evidence and clarifies the working mechanism of high-strength concrete beams reinforced with GFRP, confirming the material's potential for construction applications.

Keywords: High-strength concrete; glass fiber-reinforced polymer (GFRP); flexural behavior; crack.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển nhanh chóng của ngành Xây dựng, các kết cấu công trình hiện đại phải đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về khả năng chịu lực, độ bền lâu và tính ổn định khi chịu tác động đồng thời của tải trọng gia tăng và các điều kiện môi trường phức tạp. Trong đó, bê tông có cường độ chịu nén từ 70 đến 80 MPa có thể coi là vật liệu mới có khả năng ứng dụng cao, loại vật liệu này được ứng dụng rộng rãi trong các công trình nhà cao tầng, cầu có nhịp lớn cũng như các kết cấu ngoài và ven biển [1]. Bê tông cường độ cao với ưu điểm nổi bật về khả năng chịu nén vượt trội, tính bền lâu và khả năng giảm kích thước cấu kiện, góp phần tối ưu hóa không gian sử dụng và giảm tải trọng bản thân công trình. Tuy nhiên, khi sử dụng kết hợp với cốt thép truyền thống, bê tông cường độ cao có thể gặp phải các vấn đề liên quan đến ăn mòn trong môi trường xâm thực.

Trong khi đó, vật liệu cốt sợi composite, đặc biệt là thanh Polymer cốt sợi thủy tinh GFRP được xem là một giải pháp thay thế tiềm năng với đặc tính chống ăn mòn cao, trọng lượng nhẹ chỉ bằng 1/5 so với thanh thép thông thường, cường độ chịu kéo lớn và có độ bền lâu dài trong môi trường khắc nghiệt [2], [3]. Vì vậy, dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP nổi lên như một giải pháp kết cấu tiên tiến. Sự kết hợp này đặc biệt phù hợp cho các công trình cầu, bến cảng, các kết cấu cho công trình ven biển, những nơi mà cốt thép truyền thống thường nhanh chóng suy giảm chất lượng do hiện tượng ăn mòn, gây ra các mối lo ngại về kết cấu, tài chính và an toàn [4], [5].

Khác với thép, GFRP có đặc tính đàn hồi tuyến tính đến khi phá hoại, không có vùng chảy dẻo, dẫn đến cơ chế làm việc và dạng phá hoại của dầm bê tông cốt GFRP có nhiều điểm khác biệt so với dầm bê tông cốt thép truyền thống [6], [7], [8]. Điều này đòi hỏi phải có những nghiên cứu chuyên sâu để hiểu rõ hơn về ứng xử uốn, khả năng chịu lực, biến dạng cũng như đặc điểm phá hủy của loại dầm này.

Phần lớn các công trình nghiên cứu đều cho thấy những mặt tích cực khi sử dụng bê tông cường độ cao và thanh Polymer cốt sợi thuỷ tinh gia cường [9], [10] nhưng vẫn chưa đồng thời đánh giá được ứng xử uốn và đặc điểm phá hủy của dầm sử dụng kết hợp hai vật liệu tiềm năng này với điều kiện thực tế tại Việt Nam. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ứng xử uốn và đặc điểm phá hủy của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP. Đây chính là khoảng trống nghiên cứu mà bài báo này hướng tới. Từ đó, mở ra hướng tiếp cận mới trong thiết kế kết cấu hiện đại.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Vật liệu đầu vào dùng để chế tạo bê tông cường độ cao trong nghiên cứu này bao gồm xi măng, cốt liệu thô, cốt liệu mịn, phụ gia và nước. Trong đó, xi măng được sử dụng là loại Nghi Sơn PC50, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2020 [11].

Cốt liệu mịn trong nghiên cứu này gồm cát sông và cát nghiền với thành phần hạt được xác định thông qua thí nghiệm sàng theo TCVN 7570:2006 [12]. Phân bố hạt của cát sông phần lớn nằm trong giới hạn của miền cát trung và hơi thô với mô đun độ lớn 2,06, phù hợp đặc trưng của cát sông tự nhiên không lẫn tạp chất. Cát nghiền có mô đun độ lớn tương đối cao là 3,55 và có xu hướng là cát hạt thô, mang lại ưu điểm về giảm nhu cầu nước, tăng khả năng chịu lực và giảm co ngót của bê tông, phù hợp với việc chế tạo bê tông cường độ cao.

Cốt liệu thô sử dụng là đá dăm, theo TCVN 7570:2006 [12], đá sử dụng trong nghiên cứu này có kích thước D_{max} là 20 mm (lượng sót tích lũy trên sàng 20 mm dưới 10%), đảm bảo đáp ứng các yêu cầu về cấp phối cốt liệu thô theo TCVN 7570:2006. Cụ thể, phân tích chỉ ra rằng phần lớn cốt liệu tập trung trên sàng 10 mm (61,15%), khối lượng cốt liệu được giữ lại trên sàng 5 mm là 30,28%, trong khi chỉ 5,88% lọt qua rây 5 mm, cho thấy cốt liệu đá dăm này hoàn toàn phù hợp để sử dụng trong chế tạo bê tông hoặc các nghiên cứu yêu cầu chất lượng cốt liệu ổn định.

Phụ gia được sử dụng khi chế tạo bê tông cường độ cao là phụ gia MVN-300 HS nguồn ICCI thuộc Công ty Cổ phần Công nghiệp MVN. Đây là phụ gia siêu dẻo thế hệ mới với hiệu quả thúc đẩy quá trình đông cứng của bê tông, là phụ gia siêu dẻo loại F, phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C494 [13]. Loại phụ gia này có khả năng phân tán hạt xi măng, giảm nước rất cao, giúp phát triển cường độ sớm và cường độ cuối tốt, cải thiện độ bền và chất lượng của bê tông, cải thiện bề mặt, giảm hiện tượng co ngót và tăng khả năng chống thấm của bê tông.

Nước dùng để chế tạo bê tông phù hợp với yêu cầu kỹ thuật, đảm bảo chất lượng, không lẫn các tạp chất làm ảnh hưởng đến tính chất của bê tông và không có phản ứng phụ với loại phụ gia.

2.2. Thành phần cấp phối và quy trình thí nghiệm trên bê tông

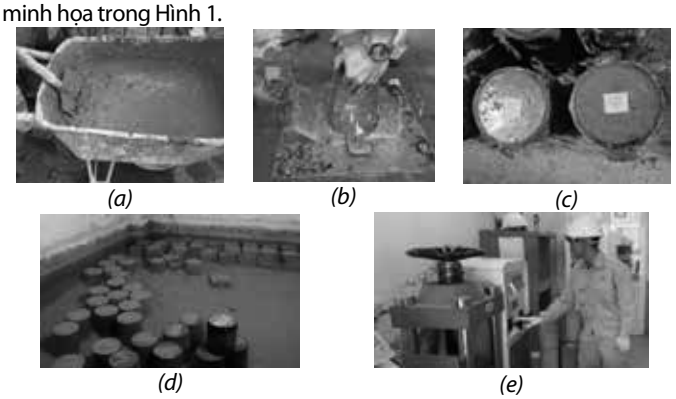
Việc thiết kế thành phần cấp phối được thực hiện dựa trên tham khảo tiêu chuẩn thiết kế thành phần bê tông cường độ cao TCVN 10306:2014 [14]. Các mẫu thí nghiệm được chế tạo gồm hai loại là bê tông cường độ cao được ký hiệu C70 và bê tông thường được ký hiệu C30 với giá trị cường độ thiết kế lần lượt là 70 MPa và 30 MPa. Nguồn vật liệu sử dụng để đúc mẫu đều được đồng bộ cho cả bê tông thường và bê tông cường độ cao như Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu cho 1 m^3 bê tông

Tên vật liệu	Đơn vị	Các cấp phối	
		C30	C70
Xi măng	kg	335	500
Cát sông	kg	559	480
Cát nghiền	kg	313	265
Đá dăm	kg	1154	1113
Phụ gia	lít	2,51	3,75
Nước	lít	145	138
Tỷ lệ W/C		0,43	0,28

Vật liệu sau khi được cân theo tỷ lệ đã tính toán sẽ được trộn đều và xác định độ sụt theo TCVN 3016:2022 [15]. Giá trị độ sụt thu được trên hai loại cấp phối lần lượt là 140 ± 20 mm (C30) và 180 ± 20 mm (C70). Có thể thấy độ sụt của bê tông thường (C30) thấp hơn bê tông cường độ cao (C70) mặc dù tỷ lệ w/c của bê tông cường độ cao thấp hơn đáng kể. Nhờ có hàm lượng xi măng cao kết hợp với việc sử dụng phụ gia, tính công tác của bê tông cường độ cao không phụ thuộc chủ yếu vào lượng nước trộn, mà phụ thuộc vào hiệu quả phân tán của phụ gia siêu dẻo trong điều kiện tỷ lệ w/c thấp.

Hỗn hợp bê tông sau đó được đúc vào khuôn chuẩn có kích thước 150×300 mm và làm phẳng bề mặt, mẫu được tiến hành bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn cho đến thời điểm thí nghiệm xác định cường độ chịu nén khi đã đạt ngày tuổi. Quy trình thí nghiệm được minh họa trong Hình 1.



(a) - Hỗn hợp bê tông sau khi trộn; (b) - Đo độ sụt; (c) - Mẫu sau khi đúc; (d) - Bảo dưỡng mẫu; (e) - Nén mẫu

Hình 1. Quy trình thí nghiệm trên bê tông

2.3. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén trên bê tông

Cường độ chịu nén của mẫu bê tông được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3118:2022 [16]. Kết quả cường độ chịu nén được thể hiện trong Bảng 2, dựa trên cấp phối bê tông đã được thiết kế theo định hướng giảm tỷ lệ w/c, tăng hàm lượng chất kết dính và kiểm soát chặt chẽ thành phần cốt liệu để chế tạo hỗn hợp bê tông cường độ cao.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của bê tông

Ký hiệu	Kích thước mẫu (mm)	Cường độ nén thiết kế (MPa)	Cường độ nén (MPa)	Cường độ nén trung bình (MPa)
C30	150×300	30	36,5	36,8
			38,4	
			35,6	
C70	150×300	70	76,5	76,8
			75,9	
			77,9	

Kết quả thí nghiệm nén trên các mẫu bê tông cho thấy các giá trị cường độ đạt lần lượt là 76,5 MPa, 75,9 MPa và 77,9 MPa, với cường độ nén trung bình đạt 76,8 MPa. Giá trị này không những vượt mức cường độ thiết kế 70 MPa mà còn thể hiện tính ổn định và độ tin cậy của cấp phối đã lựa chọn.

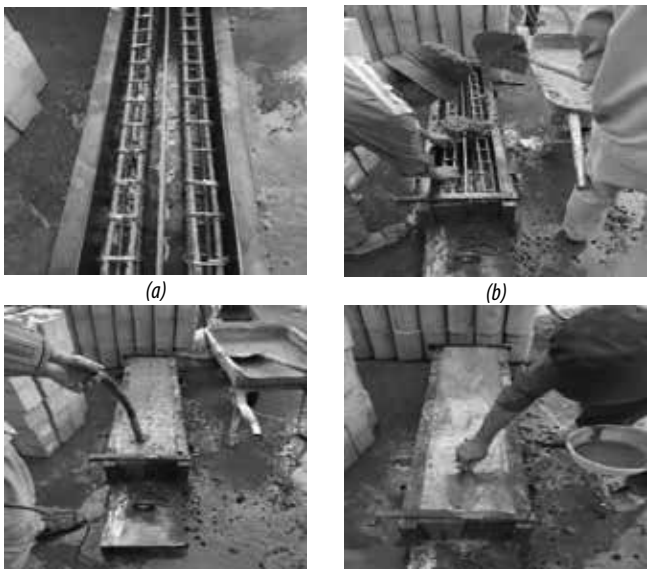
2.4. Chuẩn bị mẫu dầm

Mẫu dầm được thí nghiệm gồm 3 loại như Bảng 3, được chia thành 3 tổ, mỗi tổ có 2 mẫu với kích thước b = 120 mm, h = 200 mm và chiều dài dầm là 1500 mm. Cốt dọc được bố trí ở miền trên 2∅10 và miền dưới sử dụng 2∅20, vị trí cốt đai sử dụng ∅6 với khoảng cách được bố trí là 150 mm.

Bảng 3. Bảng ký hiệu dầm thí nghiệm

Ký hiệu	Tên gọi	Kích thước (mm)	Số lượng dầm
C30-G1	Bê tông thường cốt GFRP	120×200×1500	2
C30-G2			
C70-S1	Bê tông cường độ cao cốt thép thường	120×200×1500	2
C70-S2			
C70-G1	Bê tông cường độ cao cốt GFRP	120×200×1500	2
C70-G2			

Sau khi hoàn thành việc đổ bê tông vào khuôn dầm, các mẫu dầm được bảo dưỡng ở môi trường tự nhiên trong vòng 24 giờ. Quy trình đúc mẫu được thể hiện ở Hình 2, sau đó ván khuôn được tháo bỏ và các mẫu dầm được tiếp tục tưới nước để bảo dưỡng cho đến khi đạt cường độ yêu cầu ở 28 ngày tuổi.

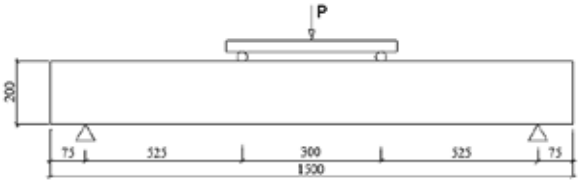


(a) - Lắp đặt ván khuôn và cốt GFRP; (b) - Đổ bê tông dầm; (c) - Đầm bê tông dầm; (d) - Làm phẳng bề mặt dầm

Hình 2. Quy trình đúc mẫu dầm bê tông

2.5. Bố trí sơ đồ và quy trình thí nghiệm trên dầm

Phương pháp thí nghiệm uốn 4 điểm được lựa chọn để thực hiện thí nghiệm trên dầm. Sơ đồ thí nghiệm như Hình 3. Độ lớn của lực tác dụng được đo bằng kích thủy lực có tải trọng 50 tấn, được lắp đặt tại khoảng giữa kích thủy lực và đỉnh dầm. Lực kế được kết nối với bộ thu dữ liệu và máy tính. Tại điểm tác dụng lực trên dầm có hai thiết bị đo chuyển vị dùng để đo độ võng và đo biến dạng tương đối. Hai thiết bị đo chuyển vị được lắp trong khoảng giữa hai lực tác dụng. Trong quá trình thí nghiệm tải trọng, độ võng và biến dạng được thu thập đồng thời.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm dầm

Hình 4. Thí nghiệm uốn 4 điểm dầm bê tông cường độ cao GFRP

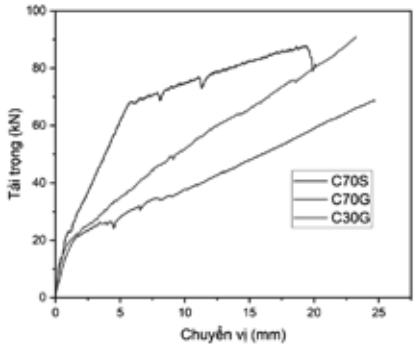
Sau khi công tác lắp đặt và căn chỉnh hệ thống thí nghiệm hoàn thành như Hình 4. Quy trình thí nghiệm tiến hành, áp dụng một mức tải sơ bộ 1,0 kN nhằm kiểm tra độ tin cậy của việc bố trí mẫu cũng như sự ổn định tổng thể của khung gia tải và thiết bị đo. Khi xác định các bộ phận làm việc bình thường và tín hiệu đo ổn định, toàn bộ giá trị đo được đặt về gốc ban đầu. Tiếp đó, tải trọng được tác dụng lên dầm thông qua pít tông thủy lực với tốc độ chuyển động xấp xỉ 1,2 mm/phút.

Trong suốt quá trình gia tải, biến dạng tại vùng bê tông chịu kéo và cốt dọc chịu kéo được quan sát liên tục để xác định thời điểm hình thành vết nứt đầu tiên. Lực tác dụng được tăng theo từng cấp, đồng thời độ võng của dầm được hệ thống ghi nhận tự động theo thời gian. Kết thúc thí nghiệm, toàn bộ hình thái và sự phân bố vết nứt trên dầm được đánh dấu lại để phục vụ cho bước phân tích và đánh giá tiếp theo.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Quan hệ tải trọng - chuyển vị của dầm

Biểu đồ so sánh quan hệ tải trọng - chuyển vị trung bình của ba loại dầm như Hình 5 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về ứng xử uốn giữa các loại dầm C30-G, C70-G và C70-S. Ở giai đoạn trước khi xuất hiện vết nứt, cả ba cấu kiện đều làm việc gần tuyến tính. Tuy nhiên, độ dốc đường cong ban đầu của hai mẫu dầm C70 cao hơn so với mẫu dầm C30. Kết quả này phản ánh ảnh hưởng đồng thời của mô đun đàn hồi vật liệu và cường độ bê tông. Việc sử dụng bê tông cường độ cao làm cải thiện đáng kể độ cứng ban đầu so với dầm sử dụng bê tông thường. Tuy nhiên, do mô đun đàn hồi của thanh GFRP thấp hơn đáng kể so với thép nên độ cứng tổng thể của dầm C70-G vẫn nhỏ hơn dầm C70-S trong cùng điều kiện.



Hình 5. So sánh quan hệ tải trọng - chuyển vị trung bình của các loại dầm

Sau khi bê tông vùng kéo bị nứt, sự khác biệt về cơ chế làm việc trở nên rõ nét hơn. Dầm C70-S xuất hiện sự suy giảm độ dốc của đường cong khi cốt thép bắt đầu chảy dẻo. Ngược lại, các dầm cốt GFRP (C30-G và C70-G) duy trì quan hệ gần tuyến tính cho đến khi phá hoại, không xuất hiện giai đoạn chảy dẻo rõ rệt, điều này phù hợp với bản chất đàn hồi - giòn của vật liệu GFRP.

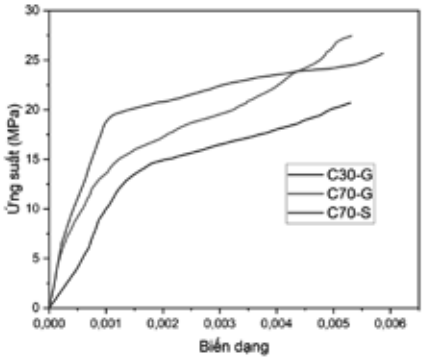
Xét về khả năng chịu tải cực hạn, dầm C70-G đạt giá trị gần tương đương dầm C70-S và cao hơn đáng kể so với dầm C3-G. Kết quả này cho thấy việc sử dụng bê tông cường độ cao có vai trò quan trọng trong việc nâng cao sức chịu uốn của dầm. Cường độ nén cao giúp tăng khả năng chịu nén của vùng bê tông phía trên trục trung hòa, qua đó cải thiện khả năng tối ưu cường độ của thanh GFRP trước khi xảy ra phá hoại. Như vậy, bê tông cường độ cao có thể bù đắp một phần hạn chế về mô đun đàn hồi của thanh GFRP trong cấu kiện chịu uốn.

3.2. Quan hệ ứng suất - biến dạng của dầm

Dựa trên biểu đồ so sánh quan hệ ứng suất - biến dạng như Hình 6, có thể nhận thấy ảnh hưởng của cả cường độ bê tông nền và loại cốt đến ứng xử uốn của cấu kiện. Việc sử dụng bê tông cường độ cao làm gia tăng đáng kể khả năng chịu ứng suất cũng như độ cứng ban đầu của dầm. Ở cùng mức biến dạng, hai mẫu sử dụng bê tông cường độ cao đều đạt giá trị ứng suất cao hơn rõ rệt so với mẫu sử dụng bê tông thường (C30-G), cho thấy vai trò chi phối của cường độ vùng nén trong cơ chế chịu uốn tổng thể. Điều này khẳng định rằng, đối với dầm cốt GFRP thì việc sử dụng bê tông cường độ cao là một giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao khả năng làm việc của tiết diện.

Xét về ảnh hưởng của loại cốt, sự khác biệt giữa C70-G và C70-S

thể hiện rõ ở dạng đường cong ứng suất - biến dạng. Dầm C70-S có độ dốc ban đầu lớn hơn, phản ánh mô đun đàn hồi cao của thép và khả năng hạn chế biến dạng tốt trong giai đoạn đầu chịu tải. Tuy nhiên, khi tải trọng tăng, độ cứng của dầm có xu hướng giảm dần do sự chuyển tiếp sang giai đoạn làm việc phi tuyến liên quan đến quá trình chảy dẻo của cốt thép.



Hình 6. So sánh quan hệ ứng suất - biến dạng trung bình của các loại dầm

Ngược lại, dầm C70-G thể hiện xu hướng tăng ứng suất tương đối đều theo biến dạng và đạt giá trị ứng suất lớn nhất trong ba loại mẫu dầm. Đặc trưng này phù hợp với bản chất đàn hồi tuyến tính đến phá hoại của thanh GFRP, không xuất hiện giai đoạn chảy dẻo như thép.

3.3. Đặc điểm phá huỷ của dầm

Trong suốt quá trình gia tải thí nghiệm, cả ba nhóm dầm đều xuất hiện vết nứt ban đầu tại khu vực giữa nhịp, nơi có vị trí chịu mô men uốn lớn nhất. Khi tải trọng tiếp tục tăng dần theo từng cấp, các vết nứt mới lần lượt hình thành và phát triển theo phương dọc trục dầm, mở rộng dần về phía các gối tựa ở hai đầu.

(a) (b)

(a) - Dầm bê tông sử dụng cốt thép; (b) - Dầm bê tông sử dụng cốt GFRP

Hình 7. Đặc điểm phá hoại của dầm

Đối với dầm bê tông sử dụng cốt thép như Hình 7(a), quá trình phá hoại thể hiện đặc trưng của cơ chế uốn dẻo. Các vết nứt uốn xuất hiện trước tiên tại vùng bê tông chịu kéo, sau đó phát triển dần theo chiều cao tiết diện và phân bố tương đối đều trong vùng chịu mô men lớn. Khi tải trọng tăng, cốt thép chịu kéo đạt đến giới hạn chảy và bắt đầu chảy dẻo, trong khi bê tông vùng nén tiếp tục chịu ứng suất tăng dần cho đến khi xảy ra hiện tượng phá hoại. Trình tự này tạo nên quá trình chuyển trạng thái từ đàn hồi sang dẻo tương đối rõ ràng, giúp cấu kiện duy trì khả năng chịu lực trong một khoảng biến dạng đáng kể trước khi phá hoại hoàn toàn.

Ngược lại, dầm bê tông sử dụng cốt GFRP như Hình 7(b) thể hiện cơ chế phá hoại mang tính giòn rõ rệt do đặc tính ứng xử đàn hồi tuyến tính đến khi đứt và không tồn tại vùng chảy dẻo của vật liệu GFRP. Sau khi bê tông vùng kéo xuất hiện vết nứt, thanh GFRP tiếp tục chịu kéo với mô đun đàn hồi thấp hơn so với thép, dẫn đến độ võng và bề rộng vết nứt tăng nhanh hơn. Sự gia tăng ứng suất vùng nén diễn ra tương đối đột ngột, làm bê tông vùng nén bị phá hoại trong thời gian ngắn mà không có dấu hiệu biến dạng dẻo trước đó. Trong một số trường hợp, nếu tỷ lệ cốt không đủ lớn, phá hoại có thể xảy ra do đứt thanh GFRP.

Do đó, trong thiết kế và đánh giá an toàn, cần đặc biệt quan tâm đến việc khống chế tỷ lệ cốt, điều kiện phá hoại mong muốn (ưu tiên việc phá hoại bê tông vùng nén thay vì đứt cốt GFRP) và các chỉ tiêu đánh giá độ dẻo tương đương.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã đánh giá thực nghiệm ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt GFRP thông qua thí nghiệm uốn bốn điểm, kết quả cho thấy:

- Việc sử dụng bê tông cường độ cao giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu lực và độ cứng ban đầu của dầm, đồng thời có thể bù đắp một phần hạn chế về mô đun đàn hồi thấp của thanh GFRP.
- Dầm cốt GFRP thể hiện quan hệ tải trọng-chuyển vị gần tuyến tính đến khi phá hoại, không xuất hiện giai đoạn chảy dẻo như dầm cốt thép, với dạng phá hoại chủ yếu là phá hoại giòn.
- Khả năng chịu tải cực hạn của dầm bê tông cốt GFRP đạt giá trị tương đương với dầm bê tông cốt thép cùng cấp cường độ bê tông, cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu này trong kết cấu chịu uốn, đặc biệt trong môi trường xâm thực. Tuy nhiên, độ võng và bề rộng vết nứt của dầm GFRP lớn hơn do đặc trưng đàn hồi của vật liệu.

Cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về các giải pháp kiểm soát độ võng và bề rộng vết nứt của dầm bê tông cốt GFRP nhằm nâng cao khả năng sử dụng trong thực tế. Đồng thời, nên xem xét tối ưu tỷ lệ cốt GFRP và điều kiện phá hoại theo hướng ưu tiên phá hoại bê tông vùng nén để đảm bảo an toàn kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phạm Duy Hữu, Nguyễn Ngọc Long, Đào Văn Đông và Phạm Duy Anh. Giáo trình bê tông cường độ cao và chất lượng cao. Hà Nội, 2008.

[2] MW Goldston, A Remennikov and MN Sheikh. Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams. Construction and Building Materials, vol. 131, pp. 606-617, Jan 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.094.

[3] Công ty Cổ phần Đầu tư và phát triển công nghệ Đại học Xây dựng (Nucetech). Chỉ dẫn thiết kế và thi công kết cấu bê tông có cốt là thanh polymer cốt sợi. Hà Nội, 2015.

[4] Vương Minh Đức, Đỗ Đức Thắng, Trần Nhật Thành và Nguyễn Văn Khánh. Giới thiệu thanh polyme cốt sợi thủy tinh (Thép polyme - GFRP). Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, số 18, tr. 83-84, 2014.

[5] Phạm Minh Tuấn, Trần Việt Tâm. Nghiên cứu tính toán độ võng ngắn hạn dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh theo TCVN 5574:2018. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 3V, tr. 74-85, 2022, doi: 10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(3V)-06.

[6] Nguyễn Minh Hải, Đỗ Việt Hải, Phan Hoàng Nam, Phạm Văn Ngọc, Huỳnh Phương Nam và Phạm Tiến Cường. Nghiên cứu tổng quan về các loại thanh FRP và tính ứng dụng của một số công thức đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP - Bê tông. Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, số 7, tr. 27-36, 2023.

[7] Nguyễn Quang Sĩ, Nguyễn Hoàng Quân. Nghiên cứu mô phỏng xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và polyme sợi thủy tinh. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, số 05, tr. 56-60, 2022, doi: 10.54772/jomc.05.2022.385.

[8] SA Mohammed, A Said. Concrete beams reinforced with longitudinal and transverse GFRP bars. Magazine of Civil Engineering, no. 5, 2024, doi: 10.34910/MCE.129.8.

[9] K Hemalatha, DR Prasad. Study on Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymer bars and Steel Rebars. Engineering Innovations, vol. 12, pp. 13-21, Jan 2025, doi: 10.4028/p-yXDMT0.

[10] MS Moawad, A Fawzi. Performance of concrete beams partially/fully reinforced with glass fiber polymer bars. Journal of Engineering and Applied Science, no. 1, pp. 38, Dec 2021, doi: 10.1186/s44147-021-00028-6.

[11] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 2682:2020 - Xi măng Poóc lăng. 2020, Hà Nội.

[12] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật. 2006, Hà Nội.

[13] ASTM International. ASTM C494 - Chemical Admixtures for Concrete. 2020.

[14] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 10306:2014 - Bê tông cường độ cao - Thiết kế thành phần mẫu hình trụ. 2014, Hà Nội.

[15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3016:2022 - Hỗn hợp bê tông - Phương pháp xác định độ sụt. 2022, Hà Nội.

[16] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3118:2022 - Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén. 2022, Hà Nội.

■Ngày nhận bài: 07/4/2026 ■Ngày sửa bài: 17/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Phân tích một số nguyên nhân gây hư hỏng công trình bê tông cốt thép

Analyze several causes of deterioration in reinforced concrete structure

> TS PHẠM HOÀNG
Bộ môn XD Nhà & CTCN, Học viện Kỹ thuật quân sự
Email: phamhoang78@yahoo.com

TÓM TẮT

Bài báo phân tích các nguyên nhân gây hư hỏng công trình bê tông cốt thép gồm hai nhóm nguyên nhân: Nguyên nhân tiêu chuẩn và Nguyên nhân phi tiêu chuẩn trong đó đi sâu vào phân tích nhóm nguyên nhân phi tiêu chuẩn gồm: các yếu tố bên trong gây hư hỏng công trình và các yếu tố bên ngoài gây hư hỏng công trình để từ đó chúng ta có góc nhìn tổng quan về nguyên nhân gây hư hỏng công trình bê tông cốt thép và đưa ra kết luận chính xác giúp quá trình sửa chữa đúng nguyên nhân và đem lại hiệu quả cao.

Từ khóa: Bê tông cốt thép; hư hỏng; ăn mòn; nguyên nhân.

ABSTRACT

The paper analyzes the causes of damage in reinforced concrete structures, dividing them into two groups: standard causes and non-standard causes. It focuses in detail on the non-standard causes, including internal factors that cause structural damage and external factors that contribute to deterioration. Based on this, an overall understanding of the causes of damage in reinforced concrete structures is developed, allowing for accurate conclusions that support repairs addressing the root causes and achieving high effectiveness.

Keywords: Reinforced concrete; damage; corrosion; cause.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong giai đoạn vừa qua, cùng với sự phát triển của đất nước, ngành xây dựng là một trong những ngành đã được đầu tư và phát triển mạnh mẽ. Các dự án xây dựng phát triển hạ tầng cũng như các dự án đáp ứng nhu cầu an cư của người dân được mọc lên khắp nơi. Tuy nhiên, một thực trạng trong ngành xây dựng hiện nay là chúng ta tập trung khởi công xây dựng mới nhưng giải pháp duy tu bảo dưỡng các công trình thì chưa được chú trọng đúng mức. Đây chính là một trong những nguyên nhân gây ra nhiều sự cố công trình. Vì vậy, bên cạnh công tác duy tu bảo dưỡng công trình cần được hoàn thiện hơn nữa thì đối với các công trình hư hỏng, việc khảo sát, nghiên cứu, xác định nguyên nhân gây hư hỏng công trình để đưa ra các giải pháp sửa chữa hiệu quả là hết sức cần thiết.

2. PHƯƠNG PHÁP TÌM NGUYÊN NHÂN VÀ PHÂN LOẠI HƯ HỎNG CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG CỐT THÉP

Khảo sát tìm nguyên nhân để đánh giá tình trạng hư hỏng của kết cấu công trình là bước đầu tiên của công tác sửa chữa, phục hồi và gia cố công trình. Đối tượng khảo sát bao gồm: Các công trình đã bị xuống cấp qua thời gian sử dụng; Các công trình bị hư hỏng do các sự cố; Các công trình có nghi vấn về chất lượng thiết kế và thi công; Các công trình có yêu cầu thay đổi về công năng sử dụng.

Công tác khảo sát đánh giá tình trạng hư hỏng của kết cấu công trình bao gồm những nội dung: Kiểm tra hồ sơ thiết kế; Khảo sát công trình tại hiện trường, kết hợp với phòng thí nghiệm xác định chất lượng vật liệu và các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng công trình; Phân tích nguyên nhân; Đánh giá tính chất, mức độ và dạng hư hỏng; Xác định khả năng chịu tải còn lại của kết cấu công trình; Cung cấp đầy đủ số liệu cho công tác thiết kế sửa chữa hoặc gia cố; Kiến nghị xử lý.

2.1. Kiểm tra hồ sơ thiết kế công trình

Để có căn cứ xác định chất lượng hiện trạng của công trình cần tiến hành tìm hiểu hồ sơ thiết kế của công trình bao gồm: Hồ sơ thiết kế ban đầu và hồ sơ thiết kế hoàn công.

Trong trường hợp công trình đã qua một vài lần sửa chữa, cải tạo hoặc gia cố, cần tìm hiểu thêm hồ sơ thiết kế của các đợt sửa chữa này.

2.1.1. Hồ sơ thiết kế ban đầu

2.1.1.1. Các dữ liệu cung cấp cho thiết kế

- Công năng sử dụng công trình và tuổi thọ dự kiến của công trình.
- Các yêu cầu công nghệ cần được đáp ứng.
- Các số liệu về điều kiện địa chất công trình, địa chất thủy văn.

2.1.1.2. Giải pháp kết cấu, chi tiết cấu tạo và tính toán

Giải pháp kết cấu cần xem xét tính hợp lý đối với phương diện công năng sử dụng của công trình, điều kiện làm việc và môi trường tác động lên công trình, điều kiện và kỹ thuật thi công cũng như điều kiện bảo trì công trình.

Sơ đồ kết cấu và các chi tiết cấu tạo phải phù hợp với sơ đồ tính toán và đáp ứng được yêu cầu về khả năng chịu tải.

Về tính toán kết cấu cần tuân theo các tiêu chuẩn, quy phạm hiện hành.

2.1.2. Hồ sơ thiết kế hoàn công

Trong hồ sơ thiết kế hoàn công của công trình phải bao gồm:

- Các văn bản điều chỉnh nhiệm vụ thiết kế ban đầu dẫn đến sửa chữa lại kết cấu cho phù hợp với dây chuyền công nghệ hoặc các biên bản xử lý sửa đổi thiết kế cho phù hợp với thực tế trong quá trình thi công.

- Những biến động về vật liệu như thay đổi các loại vật liệu (bê tông, mác bê tông, các cốt liệu, loại cốt thép, các loại vật liệu bảo vệ chống ăn mòn…). Những thay đổi về số liệu ban đầu như điều kiện địa chất công trình, địa chất thủy văn, khí hậu….

- Các hiện tượng ảnh hưởng đến chất lượng công trình trong quá trình thi công như mưa bão, lụt lội, các hiện tượng rò rỉ, cát chảy… và các giải pháp xử lý.

2.1.3. Hồ sơ thiết kế sửa chữa bảo trì

Đối với các công trình xây dựng đã qua sửa chữa một vài lần, cần tìm hiểu các hồ sơ này nhằm làm rõ quá trình chịu tải của công trình và những thay đổi so với thiết kế ban đầu. Qua đó có thể kiểm tra mức độ tác dụng, hiệu quả của những lần sửa chữa đó để có biện pháp xử lý thích hợp cho công trình.

2.2. Khảo sát hiện trạng và chất lượng thi công công trình

Để đánh giá được chính xác tình trạng hư hỏng của công trình cần quan sát tình trạng hư hỏng của công trình qua những nét khuyết tật, hư hỏng cơ bản sau: Những sai lệch kích thước của kết cấu, kích thước tiết diện; các hiện tượng lún sụt của công trình; các vết nứt thể hiện trên bề mặt của kết cấu; tình trạng xuống cấp và các khuyết tật trên bề mặt kết cấu như rỗ, bong rộp, tách vỡ, biến màu; tình trạng rò rỉ, thấm ướt hoặc mao dẫn, những chỗ tụ nước, rêu mốc; hiện tượng ăn mòn kết cấu bê tông cốt thép.

Qua khảo sát có thể sơ bộ xác định nguyên nhân gây ra hư hỏng từ đó lập kế hoạch tiến hành khảo sát tỉ mỉ bằng các phương tiện chuyên dùng để phát hiện được chính xác những khuyết tật và hư hỏng của kết cấu như chiều sâu khe nứt, ách bố trí cốt thép, đường kính cốt thép... Đặc biệt là đối với những công trình không có bản vẽ thiết kế, công tác khảo sát hiện trạng là căn cứ duy nhất để đánh giá tình trạng hư hỏng của công trình.

3. PHÂN TÍCH NGUYÊN NHÂN GÂY HƯ HỎNG CÔNG TRÌNH

3.1. Nguyên nhân và các mối quan hệ gây hư hỏng công trình

Nguyên nhân gây hư hỏng công trình BTCT rất đa dạng, tồn tại dưới nhiều hình thức khác nhau và thuộc một trong hai nhóm nguyên nhân: nhóm nguyên nhân tiêu chuẩn hoặc phi tiêu chuẩn. Nguyên nhân tiêu chuẩn là nguyên nhân gây hư hỏng công trình do tiêu chuẩn tính toán thiết kế và quản lý chất lượng công trình. Trong phạm vi bài báo này đi sâu vào phân tích nhóm nguyên nhân phi tiêu chuẩn.

Để nghiên cứu về bản chất những nguyên nhân phi tiêu chuẩn gây hư hỏng hỏng công trình ta cần quan tâm đến mối quan hệ giữa nguyên nhân và điều kiện gây hư hỏng công trình. Mối quan hệ này hết sức quan trọng vì muốn xác định rõ tình trạng hư hỏng, phải xác định được chính xác nguyên nhân gây ra hư hỏng.

Nguyên nhân gây hư hỏng công trình là các yếu tố có hại sẽ quyết định được việc phát sinh các đặc điểm của hư hỏng. Ví dụ như lớp bảo vệ cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép quá mỏng là nguyên nhân gây rỉ cốt thép. Nguyên nhân này chỉ phát huy tác dụng khi có môi trường cụ thể thích hợp.

Như vậy có nguyên nhân nhưng nguyên nhân không nhất thiết gây hư hỏng công trình nếu không có điều kiện phù hợp. Cùng nguyên nhân, nhưng có thể có những dạng hư hỏng khác nhau tùy vị trí và môi trường đặt công trình [1].

3.2. Phân loại nguyên nhân phi tiêu chuẩn

3.2.1. Yếu tố bên trong gây hư hỏng công trình

3.2.1.1. Nguyên nhân khảo sát, thăm dò

Nguyên nhân gây ra sự cố công trình xây dựng do khảo sát là những sai sót do không đánh giá đúng thành phần địa chất, không biết rõ tính chất và chiều dày của từng lớp đất, không phát hiện được những chỗ đất yếu và nguy hiểm như các túi bùn, các hang casto, không xác định được mực nước ngầm, các số liệu về khí hậu, về các công trình lân cận, các vật cản lớn trong nền đất như đá, móng cũ, các lớp đất yếu, các thấu kính bùn nằm xen kẹp trong các trầm tích phức tạp… [2].

Những sai sót trên thường dẫn đến những tốn kém khi khảo sát lại. Ngược lại nếu không phát hiện được thì thiệt hại là không thể kể được khi công trình đã đưa vào sử dụng.

3.2.1.2. Nguyên nhân thiết kế

- Trong thiết kế nền móng thường gặp những sai sót: Giải pháp nền móng sai; không tính hoặc tính không đúng độ lún công trình; quá tải đối với đất nền; ảnh hưởng của móng công trình mới tới móng của công trình cũ; móng đặt trên nền đất không đồng nhất...

- Trong các khâu thiết kế khác:

+ Sai sót trong sơ đồ kết cấu: Bản chất làm việc của hệ Công trình- Móng- Nền là không có sự tách biệt riêng rẽ, chúng làm việc đồng thời và tác động qua lại lẫn nhau. Nhưng trên thực tế, nhiều khi để đơn giản trong tính toán người ta lại tách thành hai bài toán riêng biệt và đôi khi xét tới sự ảnh hưởng qua lại giữa chúng ở một mức độ hạn chế nào đó [5].

+ Sự lựa chọn sơ đồ kết cấu và quan niệm gối tựa không chính xác.

+ Việc bố trí cốt thép không hợp lý.

+ Cấu tạo kết cấu sai.

3.2.1.3. Nguyên nhân vật liệu

Việc sử dụng vật liệu không đạt quy chuẩn là nguyên nhân của nhiều hư hỏng công trình.

Trong bê tông thì cốt liệu, xi măng và nước là các thành phần vật liệu chủ yếu. Cả ba loại vật liệu này phải đảm bảo chất lượng đồng bộ. Xi măng không đảm bảo tính chất cơ lý hóa dẫn đến chất lượng kém là nguy cơ hàng đầu dẫn đến bệnh cho công trình. Cốt liệu thô là sỏi, đá dăm nếu không đảm bảo chất lượng là nguyên nhân gây khuyết tật bên trong kết cấu... [3].

3.2.2. Yếu tố gây hư hỏng bên ngoài.

Các yếu tố bên ngoài công trình, khi tác động quá mức dự kiến vào kết cấu hoặc công trình có thể gây hư hỏng cho công trình. Ngoại nguyên nhân bao gồm:

Nguyên nhân thi công: Những sai sót trong quá trình thi công là nguyên nhân rất quan trọng làm giảm chất lượng công trình. Những sai sót này khá đa dạng thể hiện ở nhiều khía cạnh khác nhau từ công tác thi công nền móng, lắp dựng cốt thép, đổ bê tông, xây tường gạch, đến ốp lát hoàn thiện…. Nhiều sự cố xảy ra ở nước ta là do chất lượng thi công không đảm bảo [4].

Hình 1. Sập công trình do thiết kế giàn giáo không đủ tải trọng

- Nguyên nhân sử dụng: Trong quá trình sử dụng công trình, không thực hiện duy tu, bảo dưỡng công trình định kỳ, để công trình có nguy cơ hư hỏng nặng mới nghĩ đến sửa chữa là nguyên nhân rút ngắn tuổi thọ của công trình.

- Nguyên nhân cơ học: Tải trọng thuộc loại tác động cơ học gây hư hỏng công trình bao gồm các loại tải trọng tác động lên công trình như tải trọng bản thân kết cấu, tải trọng ngắn hạn và tải trọng dài hạn, tải trọng gió, sóng, áp lực đất, nước, tải trọng động đất, tải trọng do sự cố, bom đạn…. Đây là loại nguyên nhân chủ yếu gây hư hỏng cho công trình [4].

Hình 2. Hư hỏng công trình do tải trọng vượt quá quy định thiết kế

- Nguyên nhân vật lý: Yếu tố vật lý gây hư hỏng cho công trình như:

+ Nhiệt độ: Sự thay đổi về nhiệt độ làm cho thể tích vật liệu co giãn, gây nên hiện tượng nứt nẻ, cong vênh. Sự lặp đi lặp lại hiện tượng đó làm cho kết cấu bị lỏng lẻo. Ngoài ra, Sự thay đổi nhiệt độ với biên độ lớn là nguồn phát sinh sự co giãn của kết cấu... [3].

+ Các loại tia sáng: Các loại tia như bức xạ hồng ngoại, tử ngoại cũng là những nguyên nhân làm suy giảm chất lượng công trình. Bức xạ hồng ngoại được tất cả các dạng vật chất hấp thụ và gây nên sự tăng nhiệt độ, làm cho nhiệt độ bề mặt lớn hơn nhiệt độ không khí xung quanh. Ngoài ra, bức xạ tím cũng có khả năng hủy hoại các chất hữu cơ.

- Nguyên nhân hóa học: Các yếu tố hóa học gây tác hại cho công trình khá phổ biến theo cơ chế: Các chất khí xuyên qua bề mặt bê tông, sau khi đã trung hòa thành phần kiềm trong xi măng và làm giảm chức năng bảo vệ của lớp bê tông quanh cốt thép. Sự xâm nhập của các chất khí này và độ ẩm sẽ phá hủy từng phần bê tông và oxy hóa cốt thép.

Nguyên nhân sinh học: Những sinh vật sinh trưởng trên bề mặt như mốc, tảo, địa y và rêu đều có thể sinh trưởng trên bề mặt vật liệu xây dựng trong các điều kiện ẩm thích hợp. Chúng chưa hẳn đã làm phá hủy vật liệu nhưng để lâu, các tác nhân sinh học có thể sinh ra các chất trao đổi axit, một số khác có thể xâm nhập và sâu bên trong gây ra sự phá hủy cấu trúc vật liệu phủ. Sự xuống cấp này không chỉ là sự suy thoái về độ bền mà còn làm hoen ố, giảm mỹ quan của công trình [2].

Hình 3. Bê tông bị hở cốt thép do ăn mòn hóa học

4. KẾT LUẬN

- Khi công trình xảy ra sự cố, việc đầu tiên cần làm là xác định đúng nguyên nhân gây hư hỏng. Hư hỏng và nguyên nhân có mối quan hệ nhân quả, muốn biết hư hỏng cần hiểu rõ nguyên nhân và các điều kiện để nguyên nhân có cơ hội gây ra các hư hỏng đó, từ đó có các biện pháp cần thiết để ngăn ngừa các hư hỏng có thể xảy ra.

- Bài báo đi sâu vào phân tích nhóm nguyên nhân phi tiêu chuẩn để từ đó có góc nhìn tổng quan về nguyên nhân gây hư hỏng đối với công trình bê tông cốt thép giúp cho việc xác định nguyên nhân hư hỏng một cách chính xác để đưa ra giải pháp sửa chữa phù hợp và hiệu quả.

- Việc quản lý chất lượng công trình đang sử dụng cũng như công tác duy tu bảo dưỡng các công trình xây dựng hiện nay cần được hoàn thiện hơn nữa. Cần phân cấp quản lý và kiểm tra các công trình đã xây dựng một cách có hệ thống, đồng thời quy định chặt chẽ việc lưu giữ các hồ sơ công trình phục vụ công tác duy tu bảo dưỡng sửa chữa công trình đúng mục đích.

- Tiêu chuẩn quốc gia về đánh giá, phân loại mức độ xuống cấp chất lượng công trình cần được sử dụng làm căn cứ pháp lý cho việc kiểm tra, đánh giá, gia cường hoặc sửa chữa công trình phù hợp với mục đích khai thác và sử dụng công trình trong thời gian sử dụng tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lê Kiều. Giới thiệu về bệnh học công trình, NXB Hà Nội 1998.

[2]Lê Văn kiểm. Hư hỏng chữa gia cường công trình. NXB Đại học quốc gia TP.HCM 2000.

[3] Nguyễn Văn Đạt. Khoa học bê tông ngày nay, NXB Hà Nội 1992.

[4] Trần Chủng. Những bài giảng về sự cố và quản lý chất lượng kỹ thuật công trình, NXB Hà Nội 1999.

[5] Vương Hách. Sổ tay xử lý sự cố công trình xây dựng Tập 1, NXB Hà Nội 2014.

■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Tối ưu hóa tiết diện kết cấu thép nhà dân dụng bằng thuật toán SAPSO hiệu chỉnh tích hợp với SAP2000-OAPI

Optimization of steel sections for Residential Buildings using Modified SAPSO Algorithm integrated with SAP2000-OAPI

> KS NGUYỄN ĐẠI PHÁT[1,2], TS NGUYỄN HOÀNG TÙNG[2], PGS.TS TRƯƠNG ĐÌNH NHẬT[3,*], THS LÊ THỊ THÙY LINH[4]

[1]Viện sau Đại học, Trường Đại học Văn Lang, TP.HCM

[2]Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ Văn Lang, Trường Đại học Văn Lang, TP.HCM

[3]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM

[4]Khoa Sư phạm Công nghiệp, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng

[*]Email: nhat.truongdinh@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu tập trung hiệu chỉnh thuật toán Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (SAPSO) nhằm nâng cao hiệu quả giải tối ưu hóa tiết diện kết cấu thép nhà dân dụng trên cơ sở kết hợp thuật toán tối ưu với phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method, FEM). Việc tích hợp SAP2000 Open Application Programming Interface (OAPI) và MATLAB cho phép tự động hóa toàn bộ quá trình tối ưu, bảo đảm tính nhanh chóng, chính xác và tuân thủ các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành tại Việt Nam, bao gồm TCVN 5575:2024 và TCVN 2737:2023. Kết quả phân tích cho thấy thuật toán enhanced Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (eSAPSO) đạt hiệu quả tối ưu vượt trội so với SAPSO truyền thống, đồng thời đáp ứng đầy đủ các điều kiện ràng buộc về ứng suất, ổn định và chuyển vị. Mô hình đề xuất và quá trình hiệu chỉnh thuật toán góp phần thúc đẩy ứng dụng thiết kế tối ưu và tự động hóa trong lĩnh vực kết cấu thép tại Việt Nam.

Từ khóa: Metaheuristic Optimization; FEM; SAP2000-OAPI; SAPSO; TCVN 5575:2024; TCVN 2737:2023.

ABSTRACT

This study proposes an enhanced Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization algorithm (SAPSO) to improve the optimization efficiency of steel cross-sections in civil building structures. The proposed approach integrates metaheuristic optimization techniques with the finite element method (FEM) through the SAP2000 Open Application Programming Interface (OAPI) and MATLAB, enabling a fully automated and computationally efficient optimization process. The developed framework ensures compliance with current Vietnamese design standards, including TCVN 5575:2024 and TCVN 2737:2023. Comparative results demonstrate that enhanced Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (eSAPSO) outperforms the conventional SAPSO algorithm while strictly satisfying stress, stability, and displacement constraints. The proposed model contributes to advancing automated and performance-based optimal design practices in steel structural engineering in Vietnam.

Keywords: Metaheuristic Optimization; FEM; SAP2000-OAPI; SAPSO; TCVN 5575:2024; TCVN 2737:2023.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thực tiễn xây dựng, kết cấu thép được ứng dụng rộng rãi trong công trình dân dụng và công nghiệp nhờ khả năng chịu lực cao, thi công nhanh và hiệu quả kinh tế. Phân tích kết cấu hiện nay chủ yếu dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method, FEM), kết hợp các tiêu chuẩn như TCVN 5575:2024 và TCVN 2737:2023 để xác định tiết diện phù hợp. Tuy nhiên, quá trình lựa chọn tiết diện vẫn mang tính thử - sai, đòi hỏi nhiều vòng lặp kiểm tra, gây tốn thời gian và chưa khai thác tối ưu vật liệu.

Sự phát triển của các thuật toán metaheuristic, tích hợp với FEM thông qua giao diện SAP2000 Open Application Programming Interface (OAPI), đã mở ra hướng tiếp cận tự động và khoa học hơn cho bài toán tối ưu. Theo lý thuyết No Free Lunch (NFL) [1], không tồn tại thuật toán tối ưu duy nhất hiệu quả cho mọi bài toán, do đó việc cải tiến và phát triển thuật toán là điều cần thiết. Các nghiên cứu trước đó với thuật toán Multi-Objective Jellyfish Search (MOJS) [2] và Multi-Objective Enterprise Development (MOED) [3] đã cho thấy rằng khả năng

xác định xấp xỉ Pareto có độ chính xác cao và phân bố nghiệm đồng đều đối với các hàm kiểm tra.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây cũng cho thấy những cải tiến đáng kể trong hiệu quả tối ưu hóa. Cụ thể, với thuật toán Improved Electric Eel Foraging Optimisation (I-EEFO) [4] giúp nâng cao hiệu quả tìm kiếm và cải thiện tính ổn định của kết cấu khi áp dụng cho các bài toán thiết kế nhà cao tầng. Đồng thời, thuật toán Multi-Objective Pilgrimage Walk Optimization (MOPWO) [5] cũng cho thấy khả năng tạo ra các tập nghiệm Pareto chất lượng cao, góp phần nâng cao hiệu quả giải các bài toán tối ưu đa mục tiêu.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này hiệu chỉnh thuật toán Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (SAPSO) nhằm nâng cao hiệu quả tối ưu hóa tiết diện kết cấu thép, đồng thời vẫn đảm bảo các ràng buộc theo tiêu chuẩn. Thuật toán được lập trình trên MATLAB và liên kết với SAP2000-OAPI, hình thành quy trình tối ưu tự động, nhanh và hiệu quả.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn

Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method, FEM) là công cụ nền tảng trong phân tích kết cấu nhờ khả năng mô phỏng chính xác ứng xử của hệ dưới tác dụng tải trọng. Trong nghiên cứu này, FEM được tích hợp trong cơ chế cập nhật mô hình (Finite element model updating), cho phép điều chỉnh các tham số theo biến thiết kế thay vì duy trì cấu hình phân tích cố định như cách tiếp cận truyền thống, qua đó bảo đảm sự liên kết giữa tối ưu hóa và phân tích kết cấu.

Khung phương pháp được xây dựng dưới dạng quy trình lặp giữa môi trường tối ưu và môi trường phân tích. MATLAB thực hiện thuật toán tối ưu và quản lý biến thiết kế, trong khi SAP2000 đảm nhiệm phân tích phần tử hữu hạn tương ứng với từng bộ tham số. Kết quả phân tích được sử dụng để đánh giá hàm mục tiêu và kiểm tra điều kiện ràng buộc trước khi cập nhật thế hệ thiết kế tiếp theo. Việc tích hợp thông qua giao diện Open Application Programming Interface (OAPI) của SAP2000 cho phép tự động hóa quá trình cập nhật mô hình và trích xuất dữ liệu, góp phần nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của quy trình thiết kế kết cấu thép.

2.2. Thuật toán SAPSO

Thuật toán Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (SAPSO), do Truong và Chou [6] đề xuất, là một thuật toán metaheuristic được xây dựng dựa trên tư duy giải quyết vấn đề trong nghiên cứu khoa học. Thay vì mô phỏng hiện tượng tự nhiên hoặc hành vi quần thể như nhiều thuật toán phổ biến, SAPSO khai thác cấu trúc logic của quy trình nghiên cứu, bao gồm nhận diện vấn đề, đề xuất giả thuyết, thu thập thông tin và đánh giá kết quả. Các bước này được chuyển đổi thành các chiến lược tìm kiếm tương ứng và được điều phối thông qua cơ chế chuyển đổi hoạt động, nhằm duy trì sự cân bằng giữa mở rộng không gian nghiệm và tăng cường khai thác các vùng tiềm năng.

Việc phát triển SAPSO gắn liền với thực tế rằng không tồn tại thuật toán tối ưu nào đạt hiệu suất tối ưu cho mọi dạng bài toán, theo nguyên lý No Free Lunch (NFL) [1]. Trên cơ sở đó, SAPSO được định hướng như một khuôn khổ tìm kiếm có cấu trúc và khả năng thích ứng, phù hợp với các bài toán tối ưu phi tuyến và có nhiều ràng buộc trong kỹ thuật. Thuật toán khởi tạo từ một tập nghiệm ban đầu phân bố ngẫu nhiên nhằm bảo đảm tính đa dạng, trong đó mỗi cá thể đại diện cho một phương án thiết kế trong không gian tìm kiếm. Quần thể tại thời điểm t = 1 được thiết lập theo công thức sau:

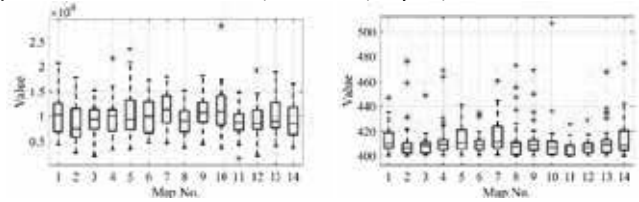
$$x_i = l_b + \mathrm{rand}(0,1) \times (u_b - l_b) \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{x_i}$ là nghiệm của cá thể thứ i, rand (0,1) là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng (0,1), còn $\mathbf{l_b}$ và $\mathbf{u_b}$ lần lượt là cận dưới và cận trên của không gian tìm kiếm.

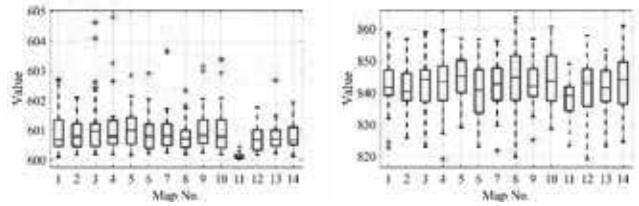
2.3. Sơ đồ khởi tạo dân số eSAPSO

Nhiều bản đồ hỗn loạn (chaotic maps) đã được đề xuất nhằm gia tăng tính đa dạng của quần thể khởi tạo, qua đó cải thiện khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu toàn cục của các thuật toán tối ưu. Để đánh giá ảnh hưởng của các bản đồ hỗn loạn đến hiệu quả hội tụ và chất lượng nghiệm tối ưu, mười ba bản đồ hỗn loạn phổ biến bao gồm : (Chebyshev (M1), Circle (M2), Gauss (M3), Intermittency (M4), Iterative (M5), Kent (M6), Liebovitch (M7), Logistic (M8), Piecewise (M9), Sine (M10), Singer (M11), Sinusoidal (M12) và Tent (M13)) [7], [8], cùng với phương pháp khởi tạo ngẫu nhiên truyền thống (M14), được sử dụng để giải bốn hàm kiểm chuẩn F1, F2, F3 và F4 trong bộ hàm CEC2022 [9, 10]. Kích thước quần thể và số vòng lặp được thiết lập lần lượt là 20 và 300.

Kết quả được phân tích thông qua biểu đồ hộp sau 30 lần chạy độc lập nhằm đánh giá độ ổn định và mức độ hội tụ của thuật toán. So sánh cho thấy chiến lược khởi tạo dựa trên bản đồ Sinusoidal đạt hiệu quả vượt trội, thể hiện qua giá trị trung vị tốt hơn và độ phân tán nhỏ hơn so với các phương pháp còn lại (Hình 1-2). Trên cơ sở đó, bản đồ Sinusoidal được lựa chọn để sinh quần thể ban đầu, và phiên bản cải tiến của thuật toán được ký hiệu là eSAPSO.



Hình 1. Stepint (F1) và Step (F2)



Hình 2. Sphere (F3) và SumSquares (F4)

2.4. Phương pháp đánh giá

Trong một khung chương trình tối ưu hóa, chỉ số đánh giá cốt lõi là giá trị hàm mục tiêu tại nghiệm tối ưu, phản ánh trực tiếp hiệu quả tìm kiếm của thuật toán. Nghiệm tối ưu phải đồng thời đạt giá trị mục tiêu tốt nhất và bảo đảm tính khả thi theo các điều kiện ràng buộc. Đối với bài toán kết cấu trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu là tổng khối lượng công trình. Do đó, giá trị tối ưu tương ứng với phương án có khối lượng nhỏ nhất nhưng vẫn thỏa mãn các yêu cầu về ứng suất, ổn định và chuyển vị theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành.

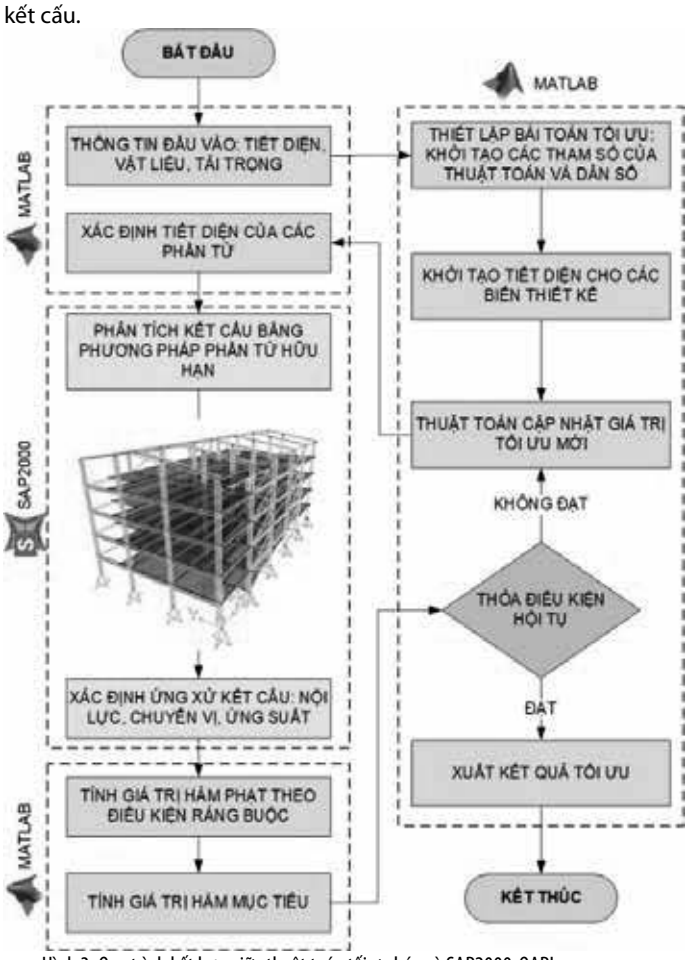
3. THIẾT LẬP BÀI TOÁN TỐI ƯU HÓA

Bài toán tối ưu hóa nhà thép dân dụng được thiết lập với bốn thành phần chính bao gồm thông số đầu vào, hàm mục tiêu, biến thiết kế và các điều kiện ràng buộc. Nghiên cứu này được áp dụng trên khung nhà thép dân dụng có bước cột L = 5.1 (m), bước khung B = 5.5 (m), chiều cao cột H_1 = 2.8 (m), chiều cao đỉnh mái H_2 = 14.36 (m). Vật liệu sử dụng là thép SS400 với các thông số vật liệu như sau $f_y = 245$ MPa, $f_u = 400$ MPa, $E = 2.06 \times 10^5$ MPa.

3.1. Khung chương trình phân tích kết cấu

Khung chương trình phân tích kết cấu (Hình 3) được thiết kế theo cơ chế tối ưu hóa tự động và khép kín, bảo đảm sự tương tác liên tục giữa môi trường tối ưu và môi trường phân tích số. Các biến thiết kế ban đầu được khởi tạo bằng Sinusoidal Map trong MATLAB

nhằm tăng cường tính đa dạng của quần thể. Các phương án tiết diện sau đó được chuyển sang SAP2000 để thực hiện phân tích phần tử hữu hạn, và kết quả phản hồi thông qua giao diện Open Application Programming Interface (OAPI) được sử dụng để đánh giá hàm mục tiêu cũng như áp dụng các cơ chế xử lý ràng buộc. Trên cơ sở đó, thuật toán enhanced Scientific Approach to Problem Solving-inspired Optimization (eSAPSO) cập nhật biến thiết kế và hình thành thế hệ nghiệm mới. Quy trình lặp này được duy trì cho đến khi đạt tiêu chí hội tụ và xác định được phương án tối ưu của kết cấu.



Hình 3. Quy trình kết hợp giữa thuật toán tối ưu hóa và SAP2000-OAPI

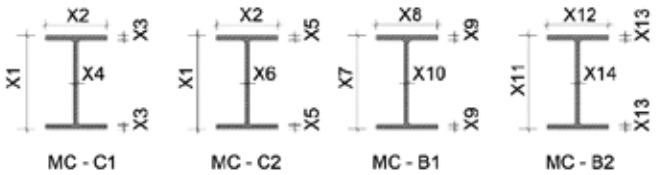
3.2. Các biến thiết kế

Công trình sử dụng thép tổ hợp tiết diện chữ I, biến thiết kế cho cấu kiện cột và dầm bao gồm, chiều cao bản bụng (h_w), chiều rộng bản cánh (b_f), chiều dày bản bụng (t_w), chiều dày bản cánh (t_f). Mặt cắt của tiết diện trong (Hình 4), biến x với $x = [x_1, x_2, \ldots x_{14}]$. Mỗi biến thiết kế sẽ được giới hạn trong một phạm vi với các điều kiện ràng buộc là cận trên và cận dưới $[L_b, U_b]$, trong đó: $L_b = [300\ 250\ 5\ 5\ 5\ 5\ 300\ 250\ 5\ 5\ 200\ 150\ 5\ 5]$, $U_b = [400\ 350\ 15\ 15\ 15\ 15\ 400\ 350\ 15\ 15\ 300\ 250\ 15\ 15]$

4. ỨNG DỤNG VÀO CÔNG TRÌNH DÂN DỤNG

4.1. Mô hình kết cấu

Mô hình kết cấu thép nhà dân dụng được xây dựng trên SAP2000 (Hình 5) dưới dạng khung không gian ba chiều gồm hệ cột, dầm và sàn. Hệ sàn được mô hình hóa bằng phần tử shell, trong khi các điều kiện liên kết và gối tựa được thiết lập phù hợp với giả thiết thiết kế nhằm bảo đảm độ cứng tổng thể và khả năng phân phối tải trọng.



Hình 4. Mặt cắt tiết diện

Hình 5. Mô hình công trình trên SAP2000

Mô hình tích hợp đầy đủ các tổ hợp tải trọng theo tiêu chuẩn hiện hành, cho phép đánh giá chính xác trạng thái ứng suất, ổn định và chuyển vị. Đây là cơ sở cho quá trình tối ưu hóa tiết diện, trong đó các thông số hình học được cập nhật tự động nhưng vẫn bảo đảm tuân thủ các ràng buộc thiết kế.

4.1.1. Tải trọng tác dụng

Toàn bộ tải trọng tác dụng lên công trình được xác định theo Tiêu chuẩn tải trọng và tác động TCVN 2737:2023. Trong đó, trọng lượng bản thân kết cấu (DL), tĩnh tải (SDL), hoạt tải sàn (LL), hoạt tải mái (LR), tải trọng gió (W). Giá trị tải trọng gió được tính theo công thức (10) của TCVN 2737:2023.

$$W_k = W_{3s,10} \times k(z_e) \times c \times G_f \quad (2)$$

trong đó $W_{3s,10}$ là áp lực gió 3s ứng với chu kỳ lặp 10 năm, $k(z_e)$ là hệ số kể đến thay đổi áp lực gió theo độ cao và dạng địa hình tại độ cao tương đương, c là hệ số khí động, G_f là hệ số hiệu ứng giật.

4.1.2. Tổ hợp tải trọng

Tổ hợp tải trọng được tổ hợp theo công thức (1) của TCVN 2737:2023:

$$C_m = \gamma_n\left(\sum_{i\geq 1}\gamma_{f,i}G_{k,i} + \sum_{j\geq 1}\gamma_{f,j}\psi_{L,j}Q_{k,L,j} + \sum_{m\geq 1}\gamma_{f,m}\psi_{t,m}Q_{k,t,m}\right) \quad (3)$$

trong đó γ_n là hệ số tầm quan trọng của công trình, $\gamma_{f,i}$ là hệ số độ tin cậy của tải trọng thường xuyên thứ i, $G_{k,i}$ là giá trị tiêu chuẩn của tải trọng thường xuyên thứ i, $\gamma_{f,j}$ là hệ số độ tin cậy của tải trọng tạm thời dài hạn thứ j, $\psi_{L,j}$ là hệ số tổ hợp của tải trọng tạm thời dài hạn thứ j, $Q_{k,L,j}$ là giá trị tiêu chuẩn của tải trọng tạm thời dài hạn thứ j, $\gamma_{f,m}$ là hệ số độ tin cậy của tải trọng tạm thời ngắn hạn thứ m, $\psi_{t,m}$ là hệ số tổ hợp của tải trọng tạm thời ngắn hạn thứ m, $Q_{k,t,m}$ là giá trị tiêu chuẩn của tải trọng tạm thời ngắn hạn thứ m..

4.2. Điều kiện ràng buộc

Các điều kiện ràng buộc về ứng suất và ổn định công trình được thiết lập theo các yêu cầu của TCVN 5575:2024, trong khi các giới

hạn về chuyển vị được áp dụng dựa trên quy định của TCVN 2737:2023. Những ràng buộc này đảm bảo phương án thiết kế tuân thủ đầy đủ các yêu cầu về an toàn và khả năng chịu lực của tiêu chuẩn hiện hành.

4.3. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu được định nghĩa là tổng khối lượng của tất cả các cấu kiện trong công trình cộng với giá trị hàm phạt.

Hàm mục tiêu: $f_{obj}(x) = f(x) + C.\mathrm{Penalty}(x)$ (4)

trong đó $f(x) = \sum_{i=1}^{n} \rho_i . A_i(x) . L_i$ là tổng khối lượng của kết cấu (kg), $\rho_i$là trọng lượng riêng của thép (kg/m^3), $A_i(x)$ là diện tích mặt cắt ngang của cấu kiện (m^2), L_i là chiều dài của cấu kiện thứ i (m), C =100000 là hằng số hàm phạt và $\mathrm{Penalty}\ (x)$ là giá trị hàm phạt.

5. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

5.1. Kết quả giải tối ưu

Trong nghiên cứu này, thuật toán SAPSO và thuật toán eSAPSO được phân tích trong MATLAB R2024a trên máy tính cá nhân với CPU Intel Core I5-10300H, tốc độ xung nhịp 2.5GHz, RAM 16GB và hệ điều hành Windows 11. Với 30 lần chạy độc lập, kết quả giải của thuật toán SAPSO và thuật toán eSAPSO được trình bày tại Bảng 1 và Bảng 2, đồng thời biểu đồ so sánh đường cong hội tụ cũng được trình bày ở Hình 6.

Kết quả thống kê và đường cong hội tụ cho thấy eSAPSO đạt hiệu năng tối ưu vượt trội so với SAPSO. Cụ thể, giá trị tốt nhất của eSAPSO đạt (48.538,68 kg); thấp hơn đáng kể so với (59.175,23 kg) của SAPSO. Đồng thời, giá trị trung bình của SAPSO (50.301 kg) cũng nhỏ hơn rõ rệt so với SAPSO (75.577 kg), phản ánh chất lượng nghiệm ổn định và nhất quán hơn qua các lần chạy độc lập. Độ lệch chuẩn của eSAPSO là (2.388,5 kg) thấp hơn nhiều so với SAPSO (10.133 kg), cho thấy mức độ phân tán nhỏ và khả năng duy trì hiệu suất hội tụ ổn định.

Bảng 1. Biến tối ưu của thuật toán (đơn vị: mm)

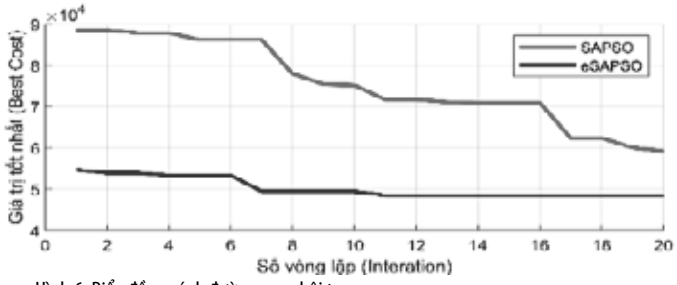
Biến (x) tối ưu (mm)	Thuật toán	
	SAPSO	eSAPSO
x_1	357	320
x_2	303	250
x_3	6	8
x_4	5	6
x_5	6	5
x_6	8	5
x_7	330	372
x_8	268	250
x_9	6	5
x_{10}	8	5
x_{11}	250	244
x_{12}	156	150
x_{13}	6	5
x_{14}	6	5

Phân tích đường cong hội tụ cho thấy eSAPSO đạt tốc độ giảm hàm mục tiêu nhanh hơn trong các vòng lặp đầu và sớm đạt trạng thái ổn định. Ngược lại, SAPSO thể hiện quá trình hội tụ chậm hơn và dao động lớn hơn trước khi đạt điểm dừng. Những kết quả này khẳng định cơ chế tìm kiếm cải tiến của eSAPSO đã nâng cao khả năng hội tụ và tăng cường sự cân bằng giữa pha khám phá và khai thác trong không gian nghiệm.

Bảng 2. Kết quả giải của thuật toán (đơn vị: kg)

Thuật toán	Tốt nhất	Xấu nhất	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Thời gian (phút)
SAPSO	59.175,23	88.492,01	75.577	10.133	195
eSAPSO	48.538,68	54.778,24	50.301	23.88,5	191

Phân tích đường cong hội tụ cho thấy eSAPSO đạt tốc độ giảm hàm mục tiêu nhanh hơn trong các vòng lặp đầu và sớm đạt trạng thái ổn định. Ngược lại, SAPSO thể hiện quá trình hội tụ chậm hơn và dao động lớn hơn trước khi đạt điểm dừng. Những kết quả này khẳng định cơ chế tìm kiếm cải tiến của eSAPSO đã nâng cao khả năng hội tụ và tăng cường sự cân bằng giữa pha khám phá và khai thác trong không gian nghiệm.

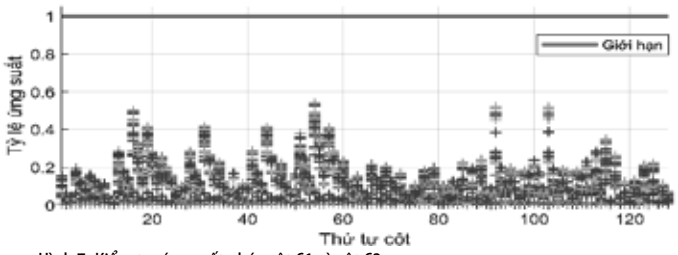


Hình 6. Biểu đồ so sánh đường cong hội tụ

5.2. Kiểm tra điều kiện ràng buộc

Để đánh giá và xác nhận tính khả thi của phương án kết cấu do thuật toán eSAPSO đề xuất, quá trình kiểm tra điều kiện ứng suất và ổn định đối với các cấu kiện cột và dầm đã được thực hiện. Kết quả kiểm tra đại diện được thể hiện thông qua ứng suất pháp của cột tại Hình 7 và ứng suất pháp của dầm tại Hình 8.

Phân tích cho thấy toàn bộ các giá trị ứng suất và hệ số ổn định của các cấu kiện đều nằm trong giới hạn cho phép, bảo đảm thỏa mãn các điều kiện ràng buộc theo TCVN 5575:2024. Bên cạnh đó, chuyển vị của kết cấu được xác định trực tiếp từ mô hình phân tích trong SAP2000 và đáp ứng thỏa mãn yêu cầu quy định của TCVN 2737:2023.

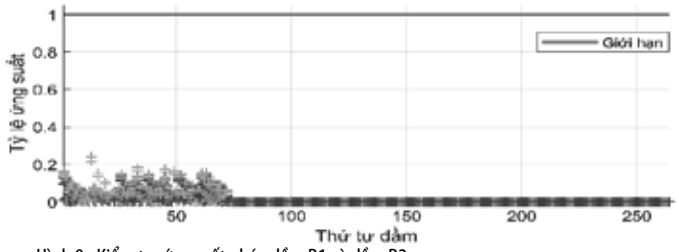


Hình 7. Kiểm tra ứng suất pháp cột C1 và cột C2

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã hiệu chỉnh thuật toán SAPSO bằng cách khảo sát và tích hợp với biểu đồ chaotic map khởi động dân số là thuật toán eSAPSO. Tiếp đó xây dựng một khung tối ưu hóa tự động cho thiết kế kết cấu nhà thép dân dụng thông qua tích hợp MATLAB và SAP2000 bằng giao diện Open Application Programming Interface

(OAPI). Mô hình tối ưu được thiết lập trên cơ sở các điều kiện ràng buộc tuân thủ tiêu chuẩn thiết kế hiện hành tại Việt Nam (TCVN 5575:2024 và TCVN 2737:2023), bảo đảm tính khả thi trong điều kiện áp dụng thực tế.



Hình 8. Kiểm tra ứng suất pháp dầm B1 và dầm B2

Kết quả thực nghiệm với 30 lần chạy độc lập cho thấy thuật toán eSAPSO đạt hiệu quả tìm kiếm vượt trội so với SAPSO, với khối lượng kết cấu nhỏ nhất đạt 48.538,68 kg và độ lệch chuẩn 2.388,5 kg, thể hiện tính ổn định và khả năng hội tụ tốt. Các phương án tối ưu thu được đều đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về ứng suất, ổn định và chuyển vị theo tiêu chuẩn thiết kế. Khung tối ưu hóa đề xuất góp phần rút ngắn thời gian tính toán, giảm phụ thuộc vào phương pháp thử-sai truyền thống và nâng cao tính lặp lại trong quá trình thiết kế. Việc tối ưu hóa khối lượng kết cấu cũng có ý nghĩa trong việc sử dụng vật liệu hợp lý, từ đó góp phần tiết kiệm chi phí và nâng cao hiệu quả kinh tế trong xây dựng.

Tuy nhiên, do số lượng vòng lặp chưa đủ lớn nên việc khai thác và tối ưu hóa vật liệu vẫn chưa đạt được mức tối ưu hoàn toàn. Mặc dù vậy, kết quả nghiên cứu đã cho thấy thuật toán eSAPSO có tốc độ hội tụ nhanh hơn đáng kể so với thuật toán SAPSO, chủ yếu nhờ vào cơ chế khởi tạo quần thể ban đầu được cải tiến. Ưu điểm này đặc biệt có ý nghĩa đối với các bài toán tối ưu yêu cầu tốc độ hội tụ cao và độ tin cậy lớn trong quá trình tìm kiếm nghiệm.

Trong phạm vi nghiên cứu hiện tại, việc đánh giá thuật toán chủ yếu tập trung vào so sánh với SAPSO. Trong các nghiên cứu tiếp theo, phạm vi so sánh có thể được mở rộng sang các thuật toán tối ưu khác, đồng thời áp dụng cho những dạng kết cấu phức tạp hơn như nhà cao tầng hoặc hệ giàn không gian. Chỉ cần thiết lập mô hình kết cấu trong SAP2000, khung tối ưu hóa được đề xuất hoàn toàn có thể sử dụng để thực hiện các bài toán tối ưu tương tự. Bên cạnh đó, việc tiếp tục cải thiện khả năng khai thác không gian tìm kiếm cũng là một hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng vật liệu và hoàn thiện hơn nữa khung tối ưu hóa đã xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D. H. Wolpert and W. G. Macready, No free lunch theorems for optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, pp. 67-82, 1997, doi: 10.1109/4235.585893.

[2] J.-S. Chou and D.-N. Truong, Multiobjective optimization inspired by behavior of jellyfish for solving structural design problems, Chaos, Solitons & Fractals, vol. 135, p. 109738, 2020/06/01/ 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2020.109738.

[3] D.-N. Truong and J.-S. Chou, Multiobjective enterprise development algorithm for optimizing structural design by weight and displacement, Applied Mathematical Modelling, vol. 137, p. 115676, 2025/01/01/ 2025, doi: 10.1016/j.apm.2024.115676.

[4] V. Jabbari, H. Azizian, R. Sojoudizadeh, L. J. P. o. t. I. o. C. E.-S. Rahimi, and Buildings, Optimal outrigger placement in tall steel frames using improved EEFO algorithm, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, vol. 179, no. 2, pp. 1-15, 2026, doi: 10.1680/jstbu.25.00137.

[5] J.-S. Chou, C.-Y. Liu, and D.-N. J. J. o. B. E. Truong, Multiobjective pilgrimage walk optimization to enhance finite element analysis of double-layer barrel vaults and grid roofs, Journal of Building Engineering, vol. 120, p. 115190, 2026, doi: 10.1016/j.jobe.2026.115190.

[6] D.-N. Truong and J.-S. J. A. I. R. Chou, Scientific approach to problem solving-inspired optimization of stacking ensemble learning for enhanced civil engineering informatics, vol. 58, no. 12, p. 404, 2025, doi: 10.1007/s10462-025-11356-x.

[7] A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari, A. H. J. C. i. N. S. Alavi, and N. Simulation, Firefly algorithm with chaos, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 18, no. 1, pp. 89-98, 2013, doi: 10.1016/j.cnsns.2012.06.009.

[8] J.-S. Chou, D.-N. J. A. M. Truong, and Computation, A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean, Applied Mathematics and Computation, vol. 389, p. 125535, 2021, doi: 10.1016/j.amc.2020.125535.

[9] P. P. Biswas and P. N. Suganthan, Large Initial Population and Neighborhood Search incorporated in LSHADE to solve CEC2020 Benchmark Problems, in 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2020: IEEE, pp. 1-7, doi: 10.1109/CEC48606.2020.9185547.

[10] D.-N. Truong and J.-S. J. A. i. C. Chou, Multi-objective scientific approach to problem solving-inspired optimization integrated with the finite element method for automated structural design, vol. 183, p. 106770, 2026, doi: 10.1016/j.autcon.2026.106770.

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu khả năng chịu uốn kết cấu dầm bê tông cốt thép cải tiến bọc thép chữ U

Study on the flexural capacity of improved reinforced concrete beam with U-shaped steel jacketing

> **KHÚC HỒNG VÂN[1], TRẦN MẠNH CƯỜNG[2], TẠ QUANG HUY[3], NGUYỄN NGỌC THẮNG[1,*]**
[1]Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi; [*]Email: thangnn@tlu.edu.vn
[2]Sinh viên K65XD, Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi
[3]Công ty Cổ phần Đầu tư Phát triển công nghệ GEC

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu về ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) liên hợp cải tiến sử dụng lớp thép tấm mỏng dạng chữ U bao bọc bên ngoài. Nghiên cứu tập trung xây dựng mô hình tính toán lý thuyết dựa trên các điều kiện cân bằng lực và tương thích biến dạng nhằm đánh giá khả năng chịu uốn của dầm liên hợp. Mô hình có xét đến sự làm việc liên hợp giữa lớp thép tấm mỏng và lõi bê tông cốt thép. Kết quả tính toán được kiểm chứng thông qua mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn và thí nghiệm thực nghiệm trên các mẫu dầm chịu uốn. Kết quả nghiên cứu cho thấy dầm cải tiến có khả năng chịu tải và độ cứng lớn hơn so với dầm bê tông cốt thép thông thường trong cùng điều kiện làm việc. Đồng thời, dầm cải tiến có tiết diện tương đối gọn, với chiều cao tiết diện xấp xỉ bề rộng tiết diện, khác với dầm BTCT truyền thống thường được thiết kế với tỷ số chiều cao trên bề rộng trong khoảng từ 1,5 đến 2,0.

Từ khóa: Dầm cải tiến liên hợp bê tông - thép; thép tấm mỏng; khả năng chịu uốn; phần tử hữu hạn; thí nghiệm kết cấu.

ABSTRACT

This study investigates the structural behavior of an improved reinforced concrete (RC) composite beam encased with a thin-walled U-shaped steel sheet. An analytical model is developed based on equilibrium and compatibility conditions to evaluate the flexural capacity of the composite beam. The formulation considers the composite interaction between the thin steel sheet and the reinforced concrete core. The analytical predictions are validated through finite element simulations and experimental testing on beam specimens subjected to bending. The results demonstrate that the improved beam exhibits a significantly higher load-carrying capacity and enhanced stiffness compared with conventional reinforced concrete beams. In addition, the improved beam maintains a relatively compact cross-sectional, with beam depth approximately equal to its width, compared with conventional reinforced concrete beams typically designed with a depth-to-width ratio ranging from 1.5 to 2.0.

Keywords: Improved composite beam; thin-walled steel sheet; thin-walled steel sheet; finite element method; structural experiment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, việc nâng cao khả năng chịu uốn của dầm BTCT thông qua việc ứng dụng các giải pháp cấu tạo mới đã thu hút sự quan tâm đáng kể của giới nghiên cứu và thực hành kỹ thuật. Trong số đó, vật liệu composite sợi (FRP) đã được sử dụng rộng rãi và cho thấy hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện khả năng chịu uốn và độ cứng của dầm BTCT [1-3]. Tuy nhiên, hiệu quả của giải pháp phụ thuộc nhiều vào liên kết giữa vật liệu composite và bê tông. Hiện tượng bong tách tại mặt tiếp xúc được chỉ ra là dạng phá hoại chủ yếu, ảnh hưởng tới sự làm việc lâu dài của kết cấu [4], [8], [9]. Bên cạnh đó, giải pháp sử dụng bản thép dán ngoài hoặc liên kết cơ học, như thép chữ U hoặc thép dạng áo bọc (steel jacket) cũng đã được nghiên cứu nhằm nâng cao khả năng chịu uốn và độ cứng của dầm BTCT [5-7], [11]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào gia cường hoặc sửa chữa các kết cấu hiện hữu, trong đó lớp thép bên ngoài chỉ đóng vai trò là phần tử gia cường bổ sung, chưa được xem xét như một thành phần chịu lực chính của tiết diện ngay từ giai đoạn thiết kế [11], [12]. Ngoài ra, hiệu quả của các giải pháp này còn hạn chế và chưa khai thác đầy đủ khả năng tương tác không gian giữa các thành phần vật liệu trong hệ kết cấu liên hợp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đề xuất một dạng dầm BTCT liên hợp cải tiến, trong đó lõi bê tông cốt thép được bao bọc bởi lớp thép tấm mỏng dạng chữ U.

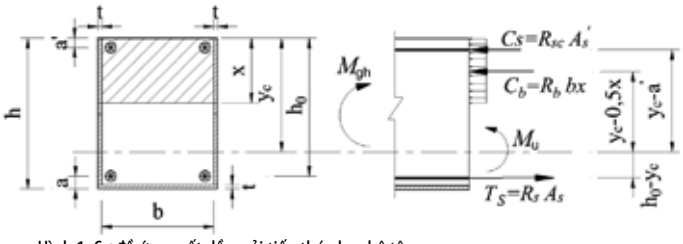
2. GIẢI PHÁP DẦM BTCT CẢI TIẾN

2.1. Các giả thuyết

Cơ sở lý thuyết trong nghiên cứu này được sử dụng theo TCVN 5574:2018 và Eurocode 4, dầm được phát triển trên nguyên lý làm việc của hệ liên hợp thép - bê tông, vật liệu bê tông và thép giả thiết làm việc theo mô hình đàn hồi - dẻo lý tưởng, liên kết giữa

tấm thép và bê tông là liên kết hoàn toàn, không xét đến trượt tương đối tại mặt tiếp xúc. Tính toán kết cấu theo phương pháp trạng thái giới hạn, giả thiết bê tông vùng nén đạt đến cường độ chịu nén khi biến dạng đạt giá trị giới hạn; cốt thép chịu kéo và tấm thép đạt đến trạng thái chảy; phân bố biến dạng trên tiết diện tuân theo giả thiết tiết diện phẳng. Nghiên cứu cũng không xét đến ảnh hưởng trực tiếp của lực cắt; cốt đai chịu hoàn toàn lực cắt, liên kết hàn với thép dọc và tấm thép tạo thành liên kết không gian.

2.2. Sơ đồ ứng suất



Hình 1. Sơ đồ ứng suất dầm cải tiến thép bọc bê tông

Khả năng chịu uốn của dầm được xác định thông qua điều kiện cân bằng lực giữa vùng bê tông chịu nén và các thành phần chịu kéo gồm cốt thép dọc chịu lực và tấm thép bọc. Các phương trình cân bằng và biểu thức tính toán được bổ sung thêm thành phần mô men chống uốn của thép bọc tính với trọng tâm của mặt cắt thép bọc chữ U, từ đó xây dựng được sơ đồ ứng suất cho dầm cải tiến như trên hình 1, trong đó: *x*: là chiều cao vùng nén được xác định theo điều kiện cân bằng lực; y_c: là trọng tâm của thép bọc bê tông hình chữ U; $M_u = W_u R_{su}$: là mô men chống uốn của thép bọc bê tông hình chữ U; R_s, R_{sc}: lần lượt là cường độ chịu kéo và nén của thép chịu lực; R_{su}: là cường độ chịu kéo của thép bọc bê tông hình chữ U; A_s *và* A_s': lần lượt là diện tích cốt thép chịu kéo và nén của dầm BTCT.

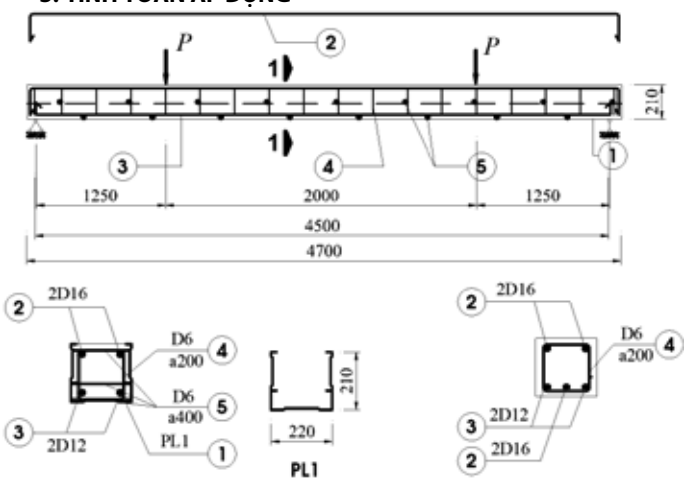
2.3. Phương trình cơ bản

Từ sơ đồ ứng suất của cấu kiện dầm thép bọc bê tông trên Hình 1, phương trình cân bằng lực (2.1) và phương trình cân bằng mô men (2.2) có dạng:

$$x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A_s'}{0,85 R_b b} \quad (2.1)$$

$$M_{gh} = R_b bx\left(y_c - 0,5x\right) + R_{sc} A'_s\left(y_c - a'\right) + R_s A_s\left(h_o - y_c\right) + M_u \quad (2.2)$$

3. TÍNH TOÁN ÁP DỤNG



Hình 2. Sơ đồ dầm cải tiến thử nghiệm so với dầm BTCT thông thường

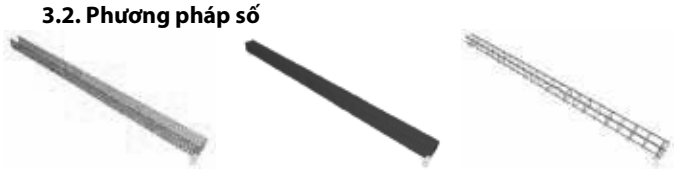
Bài toán kết cấu dầm đơn giản, một nhịp L = 4700 mm, tiết diện dầm cải tiến 220×210 mm có sử dụng tấm thép mỏng 1mm uốn hình chữ U bọc bê tông cốt thép, mô tả trên Hình 2. Ngoài tính toán giải tích theo phương trình cơ bản Eq 2.1 và Eq 2.2, khả năng chịu uốn của dầm cải tiến (TH1) được so sánh với dầm BTCT thường (TH2) thông qua thực nghiệm hiện trường mô phỏng số theo phương pháp PTHH.

3.1. Phương pháp thí nghiệm hiện trường

Sau khi bê tông dầm đạt cường độ R28, tiến hành thử tải hai dầm mẫu theo sơ đồ chất tải hai điểm tiếp xúc. Phương pháp gia tải được thực hiện bằng cách sử dụng 8 bao xi măng cho mỗi cấp gia tải *C* tương ứng P=2kN/cấp, lần lượt chất tải cấp tiếp theo cho đến khi đạt đến độ võng giới hạn đạt *f/L* = 1/200 thì dừng lại để tải ổn định và dỡ tải từ từ theo từng hàng để tải trọng về không như ban đầu. Hình 3 thể hiện sơ đồ chất tải 2 điểm tiếp xúc và bố trí các sensor đo chuyển vị được đặt lần lượt tại giữa nhịp dầm và hai vị trí còn lại cách đều điểm đo thứ nhất 0,75 m.

Hình 3. Thí nghiệm nén hiện trường và vị trí đặt các sensor đo chuyển vị dầm

3.2. Phương pháp số



a) Máng thép chữ U *b) Dầm bê tông* *c) Khung thép hàn*

Hình 4. Mô hình các lớp vật liệu dầm cải tiến

Mô hình kết cấu dầm cải tiến được thể hiện trên Hình 4, trong đó máng thép U được mô phỏng bằng phần tử Shell Thin; phần tử Solid và Frame lần lượt mô phỏng cho dầm bê tông và khung thép hàn. Thông số vật liệu của dầm được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số vật liệu dầm cải tiến

Đặc trưng cơ học	Giá trị
Thép chịu lực D16 & D12 Cường độ thép CB-300V Mô đun đàn hồi E	$\gamma = 78,5$ kN/m^3 $Rs = Rsc = 260$Mpa 2×108 kN/m^2
Thép bọc chữ U mạ kẽm Cường độ thép G300 dày 1mm Mô đun đàn hồi E	$\gamma = 78,5$ kN/m^2 $Rsu = 270$ Mpa 2×108 kN/m^2
Bê tông B25 Cường độ Mô đun đàn hồi E	$\gamma = 24$ kN/m^2; R_b=14,5 Mpa, R_{bt}= 1,55 Mpa, $R_{b,ser}$=18,5 Mpa $2,65\times107$ kN/m^2

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Đánh giá khả năng chịu uốn của dầm

Kết quả đánh giá trong Bảng 4.1 cho thấy, theo tiêu chí TC1 (độ võng giới hạn), dầm cải tiến (TH1) đạt cấp tải C9 với tổng số 72 bao tải, trong khi dầm thường (TH2) chỉ đạt cấp tải C6 tương ứng 48 bao tải (Hình 5). Như vậy, dầm cải tiến tăng khoảng 30% cả về cấp tải và năng lực chịu tải tích lũy tại trạng thái sử dụng. Điều này phản ánh rõ sự gia tăng độ cứng của dầm cải tiến so với dầm thường, đồng thời khẳng định hiệu quả của lớp thép bọc chữ U trong việc tham gia chịu lực và hạn chế biến dạng.

Bảng 2. Đánh giá khả năng chịu tải của dầm

Loại dầm	Phương pháp	TC1 (Cấp tải/ Bao XM)	TC2 (Cấp tải/ Bao XM)
Dầm cải tiến (TH1)	Lý thuyết	C6/46	C13/105
	Thực nghiệm	C9/72	-
Dầm thường (TH2)	Lý thuyết	C4/30	C9/68
	Thực nghiệm	C6/48	-
Tiêu chí 1(TC1): Đánh giá dựa trên điều kiện võng $f/L \leq 1/200$ Tiêu chí 2 (TC2): Đánh giá dựa trên điều kiện mức giới hạn chịu tải			

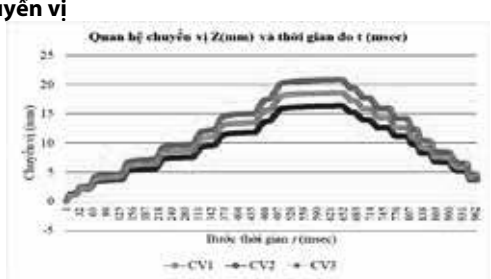
Cũng từ bảng 2, so sánh với kết quả thực nghiệm và mô hình, giá trị tải trọng đạt được trong thí nghiệm cao hơn so với mô phỏng PTHH (FEM). Nguyên nhân chủ yếu có thể do mô hình chưa xét đầy đủ ảnh hưởng của tương tác bám dính giữa thép và bê tông, cũng như cơ chế hình thành và phát triển vi nứt trong quá trình làm việc của cấu kiện. Tuy nhiên, xu hướng sai lệch giữa hai loại dầm là tương đồng, cho thấy mô hình tính toán đảm bảo độ tin cậy trong việc đánh giá và so sánh hiệu quả làm việc của các phương án kết cấu. Ở tiêu chí TC2 (trạng thái chịu lực giới hạn), dầm cải tiến tiếp tục thể hiện ưu thế với mức tăng khoảng 30% về năng lực chịu tải so với dầm thường. Kết quả này cho thấy khả năng phân phối lại nội lực và làm việc trong giai đoạn đàn - dẻo của kết cấu dầm cải tiến được cải thiện rõ rệt so với dầm thường.

Dầm thường — *C6 ×8 bao = 48 bao*

Dầm cải tiến — *C9 ×8 bao = 72 bao*

Hình 5. Kết quả chất tải đến độ võng giới hạn f/L = 1/200

4.2. Phân tích khả năng làm việc của dầm cải tiến theo điều kiện chuyển vị



Hình 6. Quan hệ chuyển vị tại 3 điểm đo theo phương pháp thực nghiệm hiện trường

Kết quả so sánh chuyển vị tại 3 điểm đo khi tăng cấp tải theo thời gian từ C1 đến C9 trên Hình 6 cho thấy chuyển vị tăng dần theo cấp tải và thời gian gia tải. Tại cấp tải lớn nhất C9, độ võng đạt giá trị cực đại tại cả 3 vị trí, trong đó điểm đo CV1 có giá trị lớn nhất xấp xỉ độ võng giới hạn cho phép 20 mm. Khi dỡ tải về 0, chuyển vị giảm đáng kể nhưng không triệt tiêu hoàn toàn; độ võng dư còn lại xấp xỉ 20% so với độ võng cực đại. Điều này cho thấy dầm làm việc chủ yếu trong miền đàn hồi, tuy nhiên đã xuất hiện hiện tượng trễ tải - dỡ tải và biến dạng dư, phản ánh tính đàn hồi không hoàn toàn của kết cấu trong quá trình khai thác thử nghiệm.

Kết quả so sánh chuyển vị giữa mô hình và kết quả đo chuyển vị hiện trường trên Hình 7 cho thấy, mô hình FEM có xu hướng đánh giá độ cứng kết cấu lớn hơn trong giai đoạn tải nhỏ và đánh giá thấp chuyển vị trong giai đoạn tải lớn. Sai số thay đổi từ dương sang âm khi tải tăng, với giá trị lớn nhất khoảng 30%.

Khi loại bỏ giai đoạn tải nhỏ, sai số trung bình nằm trong khoảng 20-25%, phù hợp với các bài toán phân tích phi tuyến. Mức sai khác này đồng thời tương đương với độ phân tán của số liệu thực nghiệm, cho thấy mô hình số có độ tin cậy tốt trong việc mô phỏng ứng xử tổng thể của kết cấu. Điều này cho thấy tiềm năng cải thiện độ cứng của giải pháp gia cường thép chữ U vẫn chưa được khai thác tối đa trong thực tế và có thể được nâng cao thông qua việc cải thiện điều kiện liên kết giữa thép và bê tông.

Hình 7. Quan hệ chuyển vị tại 3 điểm đo theo phương pháp thực nghiệm hiện trường

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất và đánh giá một dạng dầm BTCT liên hợp cải tiến sử dụng lớp thép tấm mỏng dạng chữ U bao bọc bên ngoài, trong đó lớp thép tấm vừa tham gia chịu lực vừa đóng vai trò ván khuôn vĩnh viễn trong quá trình thi công. Kết quả nghiên cứu cho thấy dầm BTCT cải tiến có khả năng chịu uốn và độ cứng lớn hơn so với dầm BTCT thông thường trong cùng điều kiện làm việc, thể hiện hiệu quả rõ rệt của lớp thép bọc chữ U trong việc tham gia chịu lực và tăng cường độ cứng tổng thể của kết cấu. Sự phù hợp giữa kết quả tính toán lý thuyết, mô phỏng số và thực nghiệm cho thấy mô hình tính toán đề xuất có độ tin cậy cao và có thể sử dụng trong phân tích và thiết kế các kết cấu liên hợp tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Zhang, Y., Liu, X., Wang, J., & Chen, Z. Experimental and theoretical study on flexural behavior of steel-concrete composite beams strengthened by CFRP plates with unbonded retrofit systems. Composite Structures, 309, 116763, 2023. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116763

[2] Attari, N., Amziane, S., & Chemrouk, M. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. Construction and Building Materials, 37, 746-757, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052

[3] Jahami, A., & Issa, C. A. An updated review on the effect of CFRP on flexural performance of reinforced concrete beams. International Journal of Concrete Structures and Materials, 18, 14, 2024. https://doi.org/10.1186/s40069-023-00651-y

[4] Tiwary, A. K., Singh, B., & Sharma, S. Comparative study on the behavior of reinforced concrete beam retrofitted with CFRP strengthening techniques. Polymers, 14(19), 4024, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14194024

[5] Gkournelos, P. D., Kalfas, C. N., & Pavlidis, P. Study of the flexural behaviour of FRP-strengthened steel–concrete composite beams. Structures, 22, 124-138, 2019. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.012

[6] De Lorenzis, L., & Teng, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. Composites Part B: Engineering, 38(2), 119-143, 2007. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003

[7] Mansour, W., El-Sayed, T. A., & El-Badry, M. Improving the flexural response of beams using externally bonded CFRP sheets. Materials, 17(2), 321, 2024. https://doi.org/10.3390/ma17020321

[8] Zeng, Y., Chen, J., & Teng, J. G. Comparative study on flexural strengthening of RC beams using externally bonded CFRP sheets and near-surface mounted CFRP bars. Journal of Composite Materials, 55(10), 1401-1415, 2021. https://doi.org/10.1177/1369433220971729

[9] Zhang, H., Li, Y., & Zhao, X. Flexural behavior of RC beams externally strengthened with a steel- and CFRP-based method. Applied Sciences, 14(20), 9281, 2024. https://doi.org/10.3390/app14209281

[10] Abdelrahman, A., Hassan, M., & Ahmed, E. Efficiency of CFRP strengthening system on flexural behavior of reinforced concrete beams. Results in Engineering, 15, 100763, 2022. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100763

[11] Su, R. K. L., Siu, W. H., & Smith, S. T. Effects of bolt–plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams. Engineering Structures, 32(6), 1769-1778, 2010. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.028

[12] Bahrami, A., & Shanmugam, N. E. Finite element studies on profiled steel composite beams. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 4(1), 1-7, 2011. https://doi.org/10.1080/19373260.2011.530107

■Ngày nhận bài: 31/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Ứng dụng mạng nơ-ron sâu dự báo góc ma sát trong của đất loại sét lẫn dăm sạn

Application of deep neural networks for predicting internal friction angle of gravelly clay soils

> THS.NCS CAO TRỌNG CÔNG, PGS.TS NGUYỄN ĐỨC MẠNH*, THS NGUYỄN ĐÌNH DŨNG, THS LÊ ANH ĐỨC
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: nguyenducmanh@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Góc ma sát trong (φ) là thông số sức kháng cắt cơ bản trong thiết kế và đánh giá ổn định công trình địa kỹ thuật. Nghiên cứu này ứng dụng mạng nơ-ron sâu (DNN) dự báo φ của đất loại sét lẫn dăm sạn dựa trên 8.353 mẫu thí nghiệm từ các tuyến giao thông miền núi phía Bắc Việt Nam. Mô hình sử dụng 10 thông số đầu vào gồm thành phần hạt (dăm cuội, sạn sỏi, cát, bụi, sét), giới hạn Atterberg (giới hạn chảy, giới hạn dẻo) và đặc trưng vật lý (khối lượng thể tích tự nhiên, khối lượng thể tích khô, tỷ trọng hạt). Dữ liệu chia theo tỷ lệ 70/30 cho huấn luyện và kiểm chứng. Kết quả đạt R^2 = 0,958 (huấn luyện) và R^2 = 0,901 (kiểm chứng), MAE = 1,244^{0}và RMSE = 1,771^0. Phân tích SHAP xác nhận khối lượng thể tích khô là thông số chi phối dự báo (giá trị ảnh hưởng 3,58), phù hợp với lý thuyết cơ học đất về vai trò trạng thái chặt-rỗng đối với sức kháng cắt. Mô hình có thể ứng dụng làm công cụ ước lượng nhanh φ, hỗ trợ thiết kế sơ bộ và đánh giá ổn định công trình.

Từ khóa: Góc ma sát trong; mạng nơ-ron sâu; địa kỹ thuật; SHAP; học máy.

ABSTRACT

The internal friction angle (φ) is a fundamental parameter governing soil shear strength and geotechnical stability. This study developed a deep neural network (DNN) to predict φ of gravelly clay soils using 8,353 samples from northern mountainous Vietnam. Ten input parameters were employed: particle size fractions (gravel, pebble, sand, silt, clay), Atterberg limits (liquid and plastic limits) and physical properties (natural bulk density, dry bulk density, specific gravity). The 70/30 train-test split yielded R^2 = 0.958 (training) and R^2 = 0.901 (testing), with MAE = 1.244^0 and RMSE = 1.771^0. SHAP analysis identified dry bulk density as the most influential predictor (SHAP value = 3.58), followed by liquid limit (1.00), natural bulk density (0.90) and plastic limit (0.78), while particle size parameters showed minimal influence (≤ 0.32), consistent with geotechnical theory on soil state and shear resistance. The model offers a rapid estimation tool for preliminary design and stability assessment.

Keywords: Internal friction angle; deep neural network; geotechnical engineering; SHAP; machine learning; Vietnam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Góc ma sát trong (φ) là thông số sức kháng cắt cơ bản, quyết định sức kháng cắt của đất theo tiêu chuẩn Mohr-Coulomb và ảnh hưởng trực tiếp đến ổn định nền móng, mái dốc và tường chắn [1, 2]. Giá trị φ phụ thuộc vào kích thước hạt, trọng lượng riêng, độ rỗng và độ ẩm. Phương pháp xác định φ gồm cắt phẳng và nén ba trục; cắt phẳng phổ biến hơn do thiết bị đơn giản và chi phí thấp nhưng tồn tại hạn chế về phân bố ứng suất không đồng đều, trong khi nén ba trục cho kết quả chính xác hơn song đòi hỏi thời gian dài và chi phí cao.

Gần đây, các phương pháp trí tuệ nhân tạo (AI) được áp dụng rộng rãi để dự báo thông số cơ lý đất, bao gồm ANN [3], rừng ngẫu nhiên [4], mô hình lai tăng cường [5]. Zhu và cộng sự [6] sử dụng BPNN và SVR dự báo φ trên 83 mẫu, trong đó SVR đạt hiệu suất tốt nhất. Ankah và cộng sự [5] đạt $R^2 \approx 0,94$ với sai số (1-2)°. Tại Việt Nam, Nguyễn Thùy Anh và cộng sự [3] xây dựng ANN dự báo φ đạt R = 0,885 trên 145 mẫu; Trần Văn Quân và cộng sự [7] áp dụng Random Forest trên 131 bộ dữ liệu; Phạm Tuấn Anh và cộng sự [8] chứng minh DNN kết hợp PSO cải thiện R^2 tăng 1,83% so với DNN thông thường.

Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu tập trung vào mô hình học máy truyền thống (ANN, SVM, Random Forest), trong khi khai thác kiến trúc học sâu cho dự báo thông số đất còn hạn chế [9]. Các mô hình nông khó biểu diễn mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa nhiều chỉ tiêu cơ lý đồng thời và nhiều nghiên cứu xây dựng trên tập dữ liệu nhỏ (vài trăm mẫu), hạn chế khả năng khái quát hóa.

Nghiên cứu này đề xuất mô hình DNN dự báo góc ma sát trong dựa trên bộ dữ liệu lớn (8.353 mẫu) phản ánh đa dạng điều kiện địa

chất. Kiến trúc DNN nhiều tầng cho phép tự động trích xuất đặc trưng tiềm ẩn và học các quan hệ phi tuyến bậc cao [10], kết hợp phân tích SHAP đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng thông số đầu vào nhằm tăng tính minh bạch và khả năng diễn giải của mô hình [12].

2. CƠ SỞ DỮ LIỆU

Dữ liệu được thu thập từ các tuyến giao thông trọng điểm khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam gồm các tuyến Hòa Bình - Sơn La, Nội Bài - Lào Cai, Tuyên Quang - Hà Giang, Hà Nội - Lạng Sơn, Đồng Đăng - Trà Lĩnh, Hạ Long - Vân Đồn cùng các mạng lưới đường khu vực liên tỉnh. Khu vực nghiên cứu có địa hình phân cắt mạnh, cấu trúc địa chất đa dạng, chịu ảnh hưởng khí hậu nhiệt đới gió mùa, dẫn đến sự thay đổi đáng kể về thành phần hạt và tính chất cơ học của đất [9].

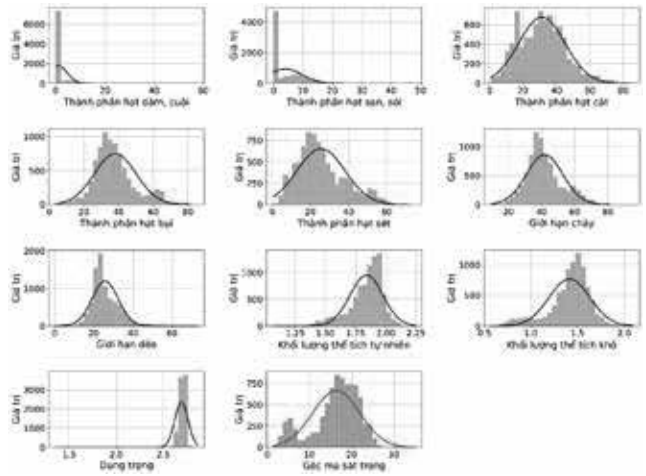
Tổng cộng 8.353 mẫu đất loại sét lẫn dăm sạn được thu thập và thí nghiệm. Bộ dữ liệu gồm 10 biến đầu vào: Thành phần hạt dăm cuội, sạn sỏi, cát, bụi, sét; giới hạn chảy; giới hạn dẻo; khối lượng thể tích tự nhiên; khối lượng thể tích khô; dung trọng. Biến đầu ra là góc ma sát trong được xác định qua thí nghiệm cắt trực tiếp theo Tiêu chuẩn TCVN 4199:2012. Bảng 1 trình bày thống kê mô tả các thông số.

Bảng 1. Phân tích thống kê các thông số đầu vào và đầu ra của mô hình - giữ nguyên

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị trung bình	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất	Độ lệch chuẩn
Thông số đầu vào						
Thành phần hạt dăm, cuội	-	%	0,995	0	57,5	3,57
Thành phần hạt sạn, sỏi	-	%	3,995	0	48	5,679
Thành phần hạt cát	-	%	31,34	1	85,3	13,835
Thành phần hạt bụi	-	%	38,101	3,9	85,2	12,03
Thành phần hạt sét	-	%	25,57	0,58	74,8	12,625
Giới hạn chảy	W_L	%	41,784	9,5	94,7	10,998
Giới hạn dẻo	W_P	%	25,786	0,617	72,75	6,702
Khối lượng thể tích tự nhiên	ρ	g/cm^3	1,841	1,07	2,24	0,136
Khối lượng thể tích khô	ρ_d	g/cm^3	1,414	0,571	2,09	0,219
Tỷ trọng hạt	Δ		2,694	1,356	2,86	0,071
Thông số đầu ra						
Góc ma sát trong	φ	(°)	16,371	1,433	35,033	5,591

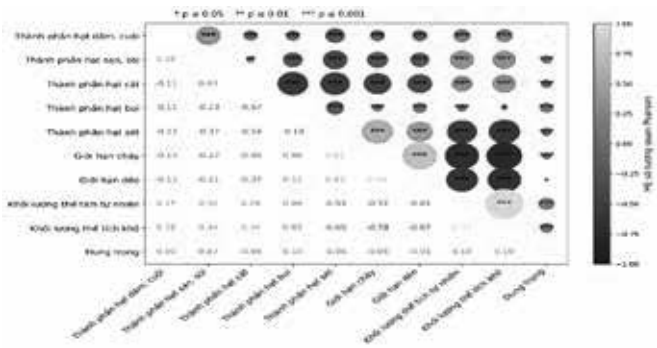
Phân tích thống kê cho thấy, nhóm hạt mịn (cát, bụi, sét) chiếm tỷ lệ chủ đạo với giá trị trung bình cao hơn so với các thành phần hạt thô, phù hợp với đặc điểm đất sét lẫn dăm sạn vùng miền núi. Các thông số khối lượng thể tích và tỷ trọng hạt có độ phân tán nhỏ (hệ số biến thiên thấp), phản ánh tính ổn định của đặc trưng vật lý. Cần lưu ý rằng, giá trị nhỏ nhất của tỷ trọng hạt (Δ = 1,356) thấp hơn đáng kể so với phạm vi thông thường của khoáng vật đất (2,6 - 2,8), có thể liên quan đến mẫu đất chứa nhiều chất hữu cơ hoặc sai số thí nghiệm. Tuy nhiên, giá trị này đã được giữ lại trong bộ dữ liệu do nằm ngoài ngưỡng loại bỏ ngoại lai.

Phân bố thống kê của các thông số (Hình 1) cho thấy bộ dữ liệu có tính đại diện và đa dạng, đáp ứng yêu cầu xây dựng mô hình học máy.



Hình 1. Phân bố thống kê của các thông số đầu vào

Ma trận tương quan Pearson (Hình 2) cho thấy các thông số thành phần hạt có mức tương quan thấp đến trung bình với nhau, trong khi khối lượng thể tích tự nhiên (ρ) và khối lượng thể tích khô (ρd) thể hiện tương quan thuận mạnh - điều này phù hợp với bản chất vật lý vì cả hai đều phản ánh trạng thái chặt-rỗng của đất. Sự tương quan cao giữa hai thông số này cũng chứng tỏ tính nhất quán của dữ liệu thí nghiệm.



Hình 2. Ma trận tương quan Pearson của các thông số đầu vào

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Mạng nơ-ron sâu (DNN)

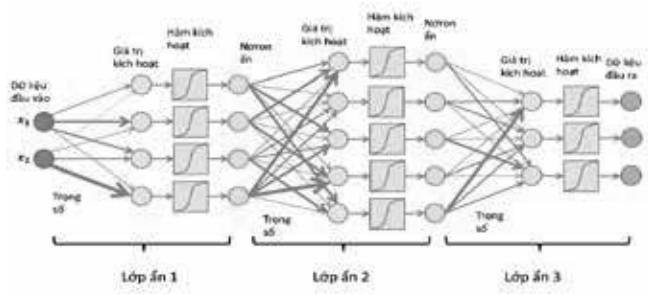
Mạng nơ-ron sâu (DNN) là kiến trúc mở rộng của mạng nơ-ron nhân tạo truyền thống, sử dụng nhiều lớp ẩn xếp chồng để học các biểu diễn phân cấp của dữ liệu [10]. Cụ thể, dữ liệu đầu vào được lan truyền tuần tự qua các lớp nơ-ron liên kết đầy đủ, tại mỗi lớp thực

hiện phép biến đổi affine (nhân ma trận trọng số và cộng vector bias), sau đó áp dụng hàm kích hoạt phi tuyến (Hình 3).

Quá trình lan truyền tiến tại lớp l được biểu diễn:

$$a^{(l)} = f(W^{(l)}.a^{(l-1)} + b^{(l)}) \quad (1)$$

Trong đó: $a^{(l-1)}$ là đầu ra lớp trước; $W^{(l)}$ là ma trận trọng số; $b^{(l)}$ là vector bias; f là hàm kích hoạt phi tuyến. Nhờ cấu trúc nhiều lớp ẩn, DNN có khả năng trích xuất các đặc trưng tiềm ẩn theo cấu trúc phân cấp từ thấp đến cao [10].



Hình 3. Sơ đồ kiến trúc mạng nơ-ron sâu (DNN)

3.2. Chỉ số đánh giá

Hiệu suất dự báo của mô hình được đánh giá thông qua ba chỉ số [11]: Hệ số xác định (R^2), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số bình phương trung bình (RMSE). Hệ số R^2 phản ánh tỷ lệ phương sai của biến phụ thuộc được giải thích bởi mô hình, nhận giá trị trong khoảng [0, 1]; R^2 càng gần 1 thì mô hình càng chính xác. Các chỉ số MAE và RMSE đo lường mức độ sai lệch trung bình giữa giá trị dự báo và giá trị thực đo, giá trị càng nhỏ phản ánh hiệu suất càng cao.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} | h_i - t_i |}{n} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - (\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (h_i - \bar{h})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_i - t_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Trong đó: n là tổng số dữ liệu; h_i là giá trị thực tế; t_i là giá trị dự báo; $\bar{h}$ là giá trị trung bình thực tế.

3.3. Phương pháp SHAP

SHAP (SHapley Additive exPlanations) là phương pháp giải thích mô hình học máy dựa trên lý thuyết giá trị Shapley trong lý thuyết trò chơi hợp tác [12]. Giá trị SHAP của mỗi thông số phản ánh mức độ đóng góp biên (marginal contribution) của thông số đó đối với kết quả dự báo, đồng thời thể hiện chiều hướng tác động (tăng hoặc giảm giá trị dự báo). Ưu điểm nổi bật của SHAP so với các phương pháp đánh giá tầm quan trọng khác (như permutation importance) là khả năng phân tích cả ở mức cục bộ (từng mẫu) và tổng thể (toàn bộ tập dữ liệu), đảm bảo tính nhất quán toán học và tăng khả năng diễn giải kết quả mô hình.

3.4. Xử lý dữ liệu và huấn luyện

Các thông số đầu vào có đơn vị và phạm vi giá trị khác nhau, do đó dữ liệu được chuẩn hóa bằng phương pháp Min-Max scaling về khoảng [0, 1] nhằm đảm bảo các biến đóng góp đồng đều trong quá trình huấn luyện. Để kiểm soát hiện tượng quá khớp, kỹ thuật dừng sớm được áp dụng: Quá trình huấn luyện tự động dừng khi sai số trên tập kiểm chứng không cải thiện sau một số vòng lặp liên tiếp. Bộ dữ liệu được chia ngẫu nhiên theo tỷ lệ 70% cho huấn luyện (5.847 mẫu) và 30% cho kiểm chứng (2.506 mẫu).

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kiến trúc và huấn luyện mô hình

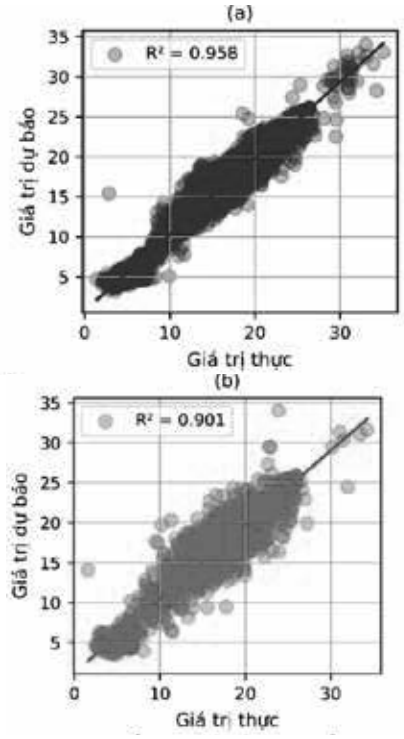
Mạng nơ-ron sâu được thiết kế gồm một lớp đầu vào (10 nơ-ron tương ứng với 10 thông số), ba lớp ẩn với số nơ-ron giảm dần và một lớp đầu ra (1 nơ-ron - giá trị φ dự báo). Tất cả các lớp ẩn sử dụng hàm kích hoạt ReLU (Rectified Linear Unit). Mô hình được huấn luyện bằng thuật toán tối ưu Adam với tốc độ học khởi tạo 0,001 và kích thước batch 32. Cơ chế điều chỉnh tốc độ học tự động (ReduceLROnPlateau) được tích hợp nhằm đảm bảo quá trình hội tụ ổn định khi giá trị hàm mất mát không tiếp tục giảm.

4.2. Hiệu suất dự báo

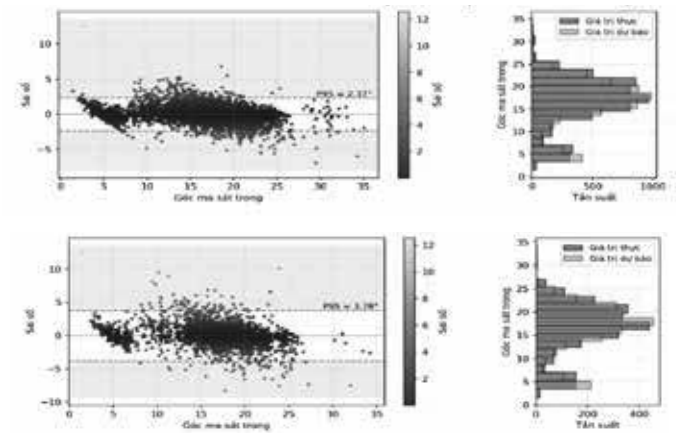
Kết quả đánh giá hiệu suất được trình bày trong Bảng 2. Mô hình DNN đạt R^2 = 0,958 trên tập huấn luyện và R^2 = 0,901 trên tập kiểm chứng. Chênh lệch R^2 giữa hai tập (ΔR^2 = 0,057) cho thấy mô hình tồn tại hiện tượng quá khớp ở mức nhẹ, tuy nhiên giá trị R^2 trên tập kiểm chứng vẫn duy trì ở mức cao (> 0,9), phản ánh khả năng tổng quát hóa chấp nhận được. Sai số dự báo trên tập kiểm chứng đạt MAE = 1,244° và RMSE = 1,771°, mức sai số này nằm trong phạm vi chấp nhận cho ước lượng sơ bộ trong thực hành địa kỹ thuật (thường cho phép sai số 1 - 3° đối với góc ma sát trong).

Bảng 2. Hiệu suất dự báo của mô hình

Thông số	Tập huấn luyện	Tập kiểm chứng
R^2	0,958	0,901
MAE	0,805	1,244
RMSE	1,139	1,771



Hình 4. Hệ số xác định R^2 của mô hình trên tập huấn luyện và kiểm chứng

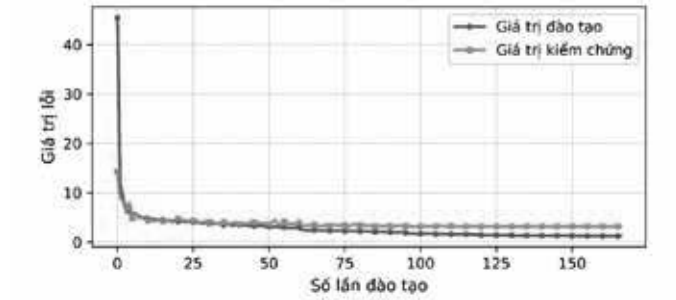


Hình 5. Phân bố sai số dự báo của mô hình DNN trên (a) tập huấn luyện và (b) tập kiểm chứng

Biểu đồ tương quan giữa giá trị thực đo và dự báo (Hình 4) cho thấy trên tập huấn luyện, các điểm dữ liệu phân bố tập trung sát đường hồi quy 1:1, phản ánh mô hình nắm bắt tốt xu thế dữ liệu. Trên tập kiểm chứng, mức độ phân tán tăng nhẹ nhưng các điểm vẫn bám sát đường hồi quy với xu thế tuyến tính rõ ràng, xác nhận khả năng dự báo ổn định của mô hình trên dữ liệu chưa được sử dụng trong huấn luyện.

Phân bố sai số trong Hình 5 cho thấy trên tập huấn luyện, sai số tập trung quanh 0 trong khoảng ±2,37°, phản ánh độ chính xác cao. Trên tập kiểm chứng, khoảng sai số mở rộng lên ±3,78 nhưng phân bố vẫn đối xứng quanh 0, cho thấy mô hình không có xu hướng thiên lệch hệ thống (bias) trong dự báo.

Biểu đồ giá trị hàm mất mát theo số vòng lặp huấn luyện (Hình 6) cho thấy sai số trên cả hai tập giảm dần và ổn định, không xuất hiện hiện tượng phân kỳ giữa tập huấn luyện và kiểm chứng - xác nhận cơ chế dừng sớm hoạt động hiệu quả trong kiểm soát quá khớp.

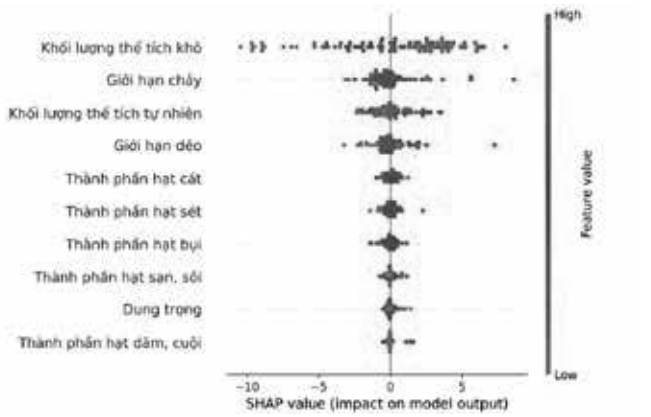


Hình 6. Giá trị lỗi theo số lần đào tạo đối với tập huấn luyện và tập kiểm chứng

4.3. Phân tích SHAP

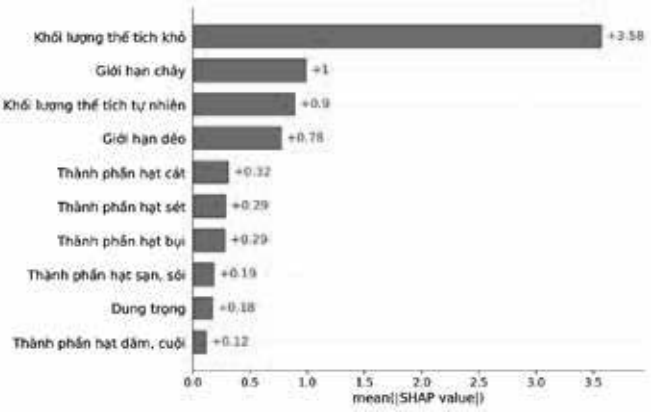
Biểu đồ phụ thuộc SHAP trong Hình 7 cho thấy khối lượng thể tích khô là thông số có ảnh hưởng mạnh nhất, tiếp theo là giới hạn chảy, khối lượng thể tích tự nhiên và giới hạn dẻo. Các thông số này có miền giá trị SHAP rộng, phản ánh vai trò chi phối trong quá trình dự báo.

Kết quả mức độ quan trọng trong Hình 8 xác nhận khối lượng thể tích khô có ảnh hưởng cao nhất (3,58), tiếp theo là giới hạn chảy (1,00), khối lượng thể tích tự nhiên (0,90) và giới hạn dẻo (0,78). Các thông số liên quan đến thành phần hạt có giá trị ảnh hưởng nhỏ (≤ 0,32). Kết quả này phù hợp với lý thuyết địa kỹ thuật khi các đặc trưng trạng thái và tính chất cơ lý của đất đóng vai trò quyết định đến khả năng kháng cắt.



Hình 7. Biểu đồ phụ thuộc từng phần theo SHAP

Kết quả SHAP cho thấy khối lượng thể tích khô phản ánh trực tiếp trạng thái chặt-rỗng của đất: Đất có khối lượng thể tích khô cao cao tương ứng với hệ số rỗng thấp, khoảng cách giữa các hạt nhỏ, diện tích tiếp xúc giữa các hạt lớn, dẫn đến tăng ma sát giữa các hạt và tăng góc ma sát trong [1, 2]. Ảnh hưởng mạnh của giới hạn chảy và giới hạn dẻo phản ánh vai trò của khoáng vật sét: Đất có giới hạn Atterberg cao thường chứa nhiều khoáng sét hoạt tính (montmorillonite, illite), tạo lớp nước hấp phụ dày quanh hạt sét, làm giảm ma sát giữa các hạt và do đó giảm góc ma sát trong. Ngược lại, các thành phần hạt thô (dăm cuội, sạn sỏi, cát) mặc dù bản thân có ma sát cao, nhưng trong hệ đất sét lẫn dăm sạn, vai trò chủ đạo thuộc về pha sét liên kết giữa các hạt thô, giải thích tại sao tỷ lệ thành phần hạt thô có ảnh hưởng SHAP thấp.



Hình 8. Mức độ ảnh hưởng của các thông số theo giá trị SHAP

4.4. Thảo luận

Mô hình DNN đạt hiệu suất dự báo cao với R^2 = 0,901 trên tập kiểm chứng, vượt trội so với nhiều nghiên cứu trước đó sử dụng tập dữ liệu nhỏ hơn. So sánh với Nguyễn Thùy Anh và cộng sự [3] (R = 0,885, 145 mẫu) và Ankah và cộng sự [5] ($R^2 \approx 0,94$, quy mô mẫu nhỏ), kết quả nghiên cứu này đáng tin cậy hơn nhờ bộ dữ liệu quy mô lớn (8.353 mẫu) phủ đa dạng điều kiện địa chất. Tuy nhiên, chênh lệch R^2 giữa tập huấn luyện và kiểm chứng (ΔR^2 = 0,057) cho thấy mô hình vẫn tồn tại hiện tượng quá khớp nhẹ. Các nghiên cứu tiếp theo cần xem xét áp dụng kỹ thuật chính quy hóa (regularization) hoặc dropout để cải thiện khả năng tổng quát hóa.

Với mức sai số MAE = 1,244° và RMSE = 1,771° trên tập kiểm chứng, mô hình có thể đóng vai trò công cụ ước lượng nhanh góc ma sát trong dựa trên các thông tin khảo sát sẵn có, hỗ trợ kỹ sư định hướng giá trị tham khảo ở giai đoạn thiết kế sơ bộ. Các sai số lớn chỉ xuất hiện cục bộ tại miền giá trị biên (φ rất nhỏ hoặc rất lớn),

phù hợp với thực tiễn khi các giá trị cực trị thường cần được kiểm chứng bổ sung bằng thí nghiệm. Mô hình không nhằm thay thế các thí nghiệm truyền thống xác định sức kháng cắt, mà đóng vai trò công cụ hỗ trợ ra quyết định, góp phần tối ưu hóa công tác khảo sát và thiết kế địa kỹ thuật.

Cần lưu ý rằng nghiên cứu sử dụng phương pháp chia ngẫu nhiên tập dữ liệu, chưa xem xét tương quan không gian giữa các mẫu cùng tuyến đường hoặc cùng hố khoan. Ngoài ra, việc chưa đưa vào so sánh mô hình cơ sở (baseline) đơn giản như hồi quy tuyến tính bội là một hạn chế cần được bổ sung trong các nghiên cứu tiếp theo.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và kiểm chứng mô hình mạng nơ-ron sâu (DNN) dự báo góc ma sát trong của đất loại sét lẫn dăm sạn dựa trên 8.353 mẫu thí nghiệm từ khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam. Các kết luận chính bao gồm:

- Mô hình DNN đạt hiệu suất cao với R^2 = 0,958 trên tập huấn luyện và R^2 = 0,901 trên tập kiểm chứng, cùng sai số MAE = 1,244° và RMSE = 1,771°, phản ánh khả năng tổng quát hóa tốt trên bộ dữ liệu lớn và đa dạng địa chất.
- Phân tích SHAP cho thấy khối lượng thể tích khô là thông số chi phối kết quả dự báo (giá trị ảnh hưởng 3,58), phù hợp với lý thuyết cơ học đất về vai trò quyết định của trạng thái chặt-rỗng đối với sức kháng cắt.
- Mô hình có thể ứng dụng làm công cụ ước lượng nhanh góc ma sát trong, hỗ trợ thiết kế sơ bộ và đánh giá ổn định công trình địa kỹ thuật trong giai đoạn khảo sát ban đầu.
- Hướng phát triển tiếp theo bao gồm mở rộng nghiên cứu cho các loại đất khác nhau, tích hợp thêm các thông số môi trường (độ ẩm, lịch sử ứng suất), áp dụng kỹ thuật kiểm chứng chéo không gian (spatial cross-validation) và so sánh với mô hình cơ sở để nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo năm 2026, mã số B2026-GHA-01, do Trường Đại học Giao thông vận tải chủ trì.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hoàng Việt Hùng, Nguyễn Quang Tuấn, Ngô Văn Linh, Trịnh Minh Thụ. Cơ học đất nâng cao. NXB. Bách Khoa Hà Nội, 2025.

[2] Ngô Thị Thanh Hương. Cơ học đất. NXB. Xây dựng, 2017.

[3] T.-A. Nguyen, H.-B. Ly, B.T. Pham. Backpropagation neural network-based machine learning model for prediction of soil friction angle. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, no. 1, 8845768, 2020, doi: 10.1155/2020/8845768.

[4] M. Hiba, A.F. Ibrahim, S. Elkatatny, A. Ali. Prediction of cohesion and friction angle from well-logging data using decision tree and random forest. Arabian Journal of Geosciences, vol. 15, no. 1, 26, 2022, doi: 10.1007/s12517-021-09154-0.

[5] M.L.Y. Ankah, S. Adjei-Yeboah, Y.Y. Ziggah, E.N. Asare. Advanced hybrid machine learning models with explainable AI for predicting residual friction angle in clay soils. Scientific Reports, vol. 15, no. 1, 25868, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-10069-3.

[6] L. Zhu, Q. Liao, Z. Wang, J. Chen, Z. Chen, Q. Bian, Q. Zhang. Prediction of soil shear strength parameters using combined data and different machine learning models. Applied Sciences, vol. 12, no. 10, 5100, 2022, doi: 10.3390/app12105100.

[7] V.Q. Tran, T.A. Pham. Investigation of input number effect on performance prediction of soil friction angle using random forest. Trong: CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure, Springer, pp. 1859-1866, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-7160-9_188.

[8] T.A. Pham, V.Q. Tran, H.-L.T. Vu. Evolution of deep neural network architecture using particle swarm optimization to improve the performance in determining the friction angle of soil. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, no. 1, 5570945, 2021, doi: 10.1155/2021/5570945.

[9] H. Liu, H. Su, L. Sun, D. Dias-da-Costa. State-of-the-art review on the use of AI-enhanced computational mechanics in geotechnical engineering. Artificial Intelligence Review, vol. 57, no. 8, 196, 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10836-w.

[10] S. Wang, Q. Wang, N. Bailey, J. Zhao. Deep neural networks for choice analysis: A statistical learning theory perspective. Transportation Research Part B: Methodological, vol. 148, pp. 60-81, 2021, doi: 10.1016/j.trb.2021.03.011.

[11] D. Chicco, M.J. Warrens, G. Jurman. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science, vol. 7, e623, 2021, doi: 10.7717/peerj-cs.623.

[12] G. Van den Broeck, A. Lykov, M. Schleich, D. Suciu. On the tractability of SHAP explanations. Journal of Artificial Intelligence Research, vol. 74, pp. 851-886, 2022, doi: 10.1613/jair.1.13283.

■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Ứng dụng phần mềm Universal Mechanism (UM) trong mô phỏng động lực học toa xe

Application of Universal Mechanism (UM) software in railcar dynamic simulation

> TÀO VĂN CHIẾN
Trường Đại học Giao thông vận tải; Email: chientv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu và thiết kế phương tiện đường sắt, mô hình hóa và mô phỏng động lực học đầu máy, toa xe đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá độ ổn định, an toàn và chất lượng vận hành. Bài báo nghiên cứu ứng dụng phần mềm Universal Mechanism (UM) để xây dựng mô hình động lực học toa xe hàng trên cơ sở xây dựng mô hình và liên kết các bộ phận như bộ trục bánh xe, thân xe, má giá, hệ thống treo và tác dụng tương hỗ giữa bánh xe - ray. Trên cơ sở mô hình này, nghiên cứu tiến hành đánh giá tính năng động lực học của toa xe khi thông qua đường cong. Kết quả cho thấy phần mềm UM là công cụ hiệu quả và phù hợp cho nghiên cứu động lực học phương tiện đường sắt.

Từ khóa: UM; động lực học; mô hình; bánh xe-ray; mô phỏng.

ABSTRACT

In the research and design of railway vehicles, the modeling and simulation of locomotive and rolling stock dynamics play an important role in evaluating stability, safety, and operational quality. This paper studies the application of the Universal Mechanism (UM) software to develop a dynamic model of a freight wagon. The model is constructed by establishing and linking key components such as the wheelsets, car body, bogie frame, suspension system, and the wheel-rail interaction. This model is then used to investigate the dynamic performance of the wagon when negotiating curves. The results show that the UM software is an effective and suitable tool for studying the dynamics of railway vehicles.

Keywords: Universal Mechanism; dynamics; modeling; wheel-rail interaction; simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tính toán thiết kế hoặc kiểm nghiệm phương tiện đường sắt thì động lực học là một trong những nội dung nghiên cứu then chốt. Cùng với sự phát triển của ngành đường sắt, đặc biệt là đường sắt tốc độ cao và đường sắt đô thị, khi tính toán thiết kế, kiểm nghiệm về động lực học đòi hỏi các phương pháp tính toán phân tích chính xác.

Các phương pháp thử nghiệm thực tế thường gặp nhiều hạn chế về chi phí, thời gian và khả năng khảo sát nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Vì vậy, mô phỏng dựa trên mô hình động lực học đa vật thể đã trở thành xu hướng nghiên cứu phổ biến.

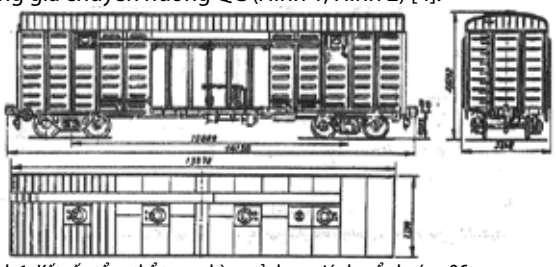
Phần mềm UM được phát triển tại Trường Đại học Kỹ thuật Bryansk (Nga), sau này được phát triển bởi công ty công ty Công ty Universal Mechanism.

UM là phần mềm chuyên dụng cho mô phỏng cơ học và phương tiện đường sắt, cho phép mô hình hóa chi tiết tương tác bánh xe - ray, hệ thống treo và các phần tử lực của phương tiện [1-3]. Bài báo này tập trung trình bày quá trình ứng dụng phần mềm UM để xây dựng mô hình động lực học toa xe hàng, làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về ổn định và dao động.

2. NỘI DUNG

2.1. Kết cấu tổng thể giá toa xe hàng QC

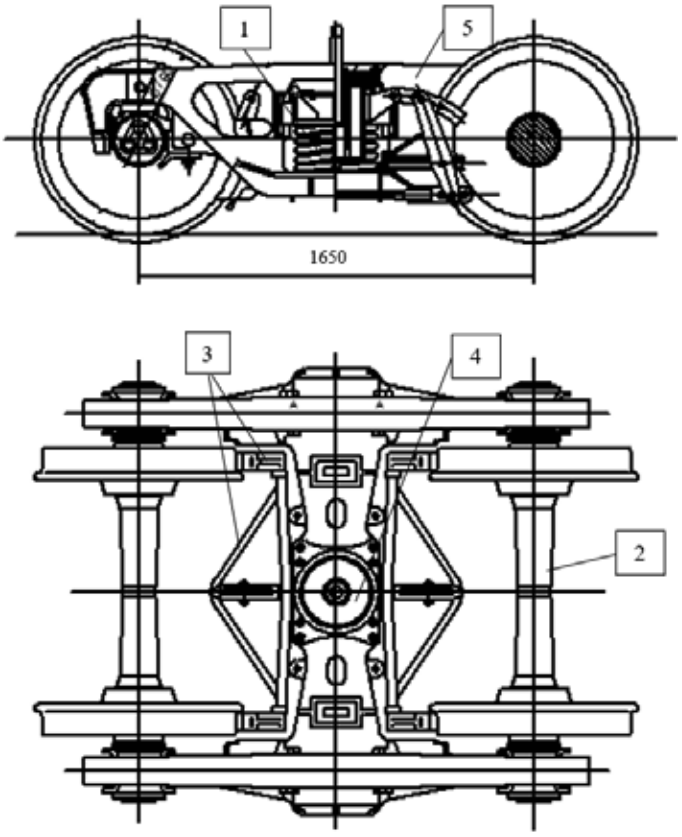
Giá chuyển hướng dùng má giá có kết cấu thép đúc, cối chuyển đúc liền xà nhún, giảm chấn ma sát xà nhún xà hãm đúc liền, kiểu trượt. Giá chuyển hướng sử dụng lò xo trung ương thép tròn, không có hệ thống lò xo bầu dầu. Kết cấu và thông số kỹ thuật toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC (Hình 1, Hình 2) [4]:



Hình 1. Kết cấu tổng thể toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC

STT	Tham số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng thân xe	tấn	52,5
2	Tốc độ cấu tạo	km/h	100
3	Cự ly tâm 2 giá chuyển	mm	10000
4	Cự ly trục	mm	1650
5	Bán kính bánh xe	mm	750
6	Tải trọng trục	tấn	14
7	Tự nặng giá chuyển	tấn	4,97
8	Trọng lượng dưới lò xo	tấn	6,716
9	Khoảng cách giữa 2 vòng lăn	mm	1070
10	Bán kính thông qua bé nhất	m	97



1- Lò xo trung ương; 2- Bộ trục bánh xe; 3- Hệ thống hãm; 4- Cối chuyển hướng; 5- Má giá

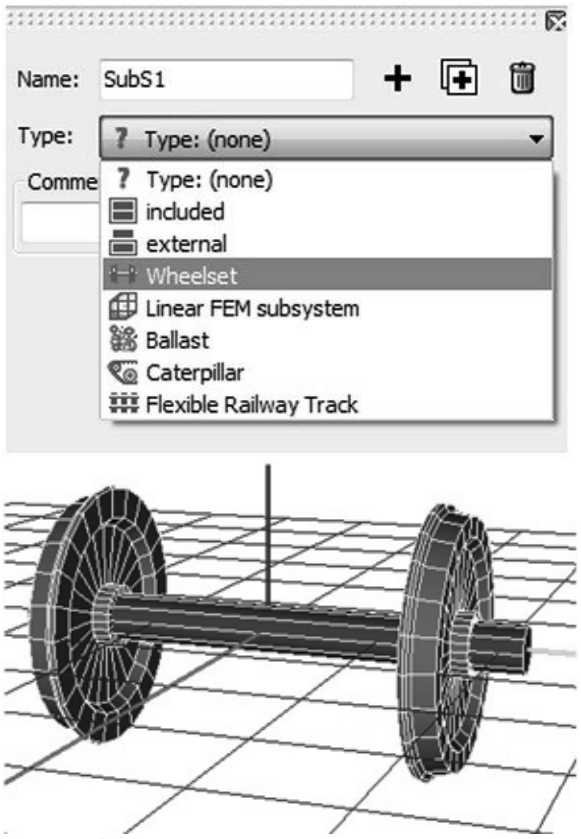
Hình 2. Kết cấu tổng thể giá chuyển hướng QC

Căn cứ vào kết cấu của toa xe, trong quá trình thành lập mô hình xét đến các liên kết ngang giữa thân xe và giá chuyển hướng, hệ thống treo. Phân tích mô phỏng động lực học phương tiện đường sắt có thể được thực hiện bằng phương pháp mô hình hóa đa vật rắn. Khi xây dựng mô hình, các bộ phận cấu thành đều được coi là vật rắn lý tưởng, do đó ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi được bỏ qua, chỉ khi phân tích tính đàn hồi của kết cấu, hoặc dao động đàn hồi của kết cấu mới khảo sát đến tính đàn hồi giữa các bộ phận với nhau, như giá chuyển hướng, thân phương tiện, bánh xe. Mỗi vật thể có 3 bậc tự do chuyển động và 3 bậc tự do tịnh tiến, tổng cộng là 6 bậc tự do. Nếu lấy trọng tâm của toa xe làm tọa độ, bậc tự do dao động tịnh tiến của toa xe bao gồm: dao động ngang, dao động thẳng đứng và dao động dọc; ba dao động quay bao gồm: dao động lăn ngang, dao động gật đầu, dao động lắc đầu [6], [7].

2.2. Mô phỏng động lực học của bộ trục bánh xe toa xe hàng

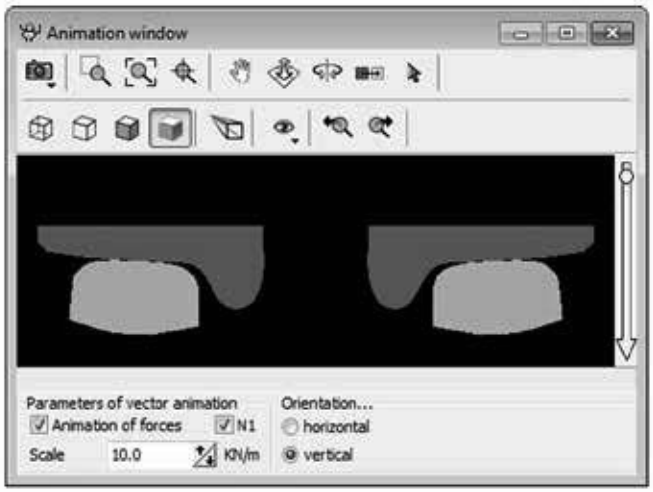
Mô hình bánh xe của toa xe bao gồm 5 bậc tự do: dao động thẳng đứng, dao động nằm ngang, dao động lăn ngang, dao động quay, dao động lắc đầu. Trong quá trình mô phỏng bánh xe có thể chuyển động trong không gian, dẫn đến sự dịch chuyển vị trí theo phương thẳng đứng của bánh xe nên khiến cho bánh xe và ray có thể tách rời tại vị trí điểm tiếp xúc. Mô hình mô phỏng bánh xe toa xe như Hình 3.

Các bộ bánh xe được xây dựng bằng mô đun trục bánh xe có sẵn trong UM, ứng với các tham số chính như khối lượng, mômen quán tính và bán kính vòng lăn. Việc sử dụng mô đun tiêu chuẩn giúp đảm bảo tính chính xác và thuận tiện trong mô phỏng tiếp xúc bánh xe - ray. Các bước xây dựng mô hình bộ trục bánh như hình dưới.



Hình 3. Mô phỏng bộ trục bánh xe

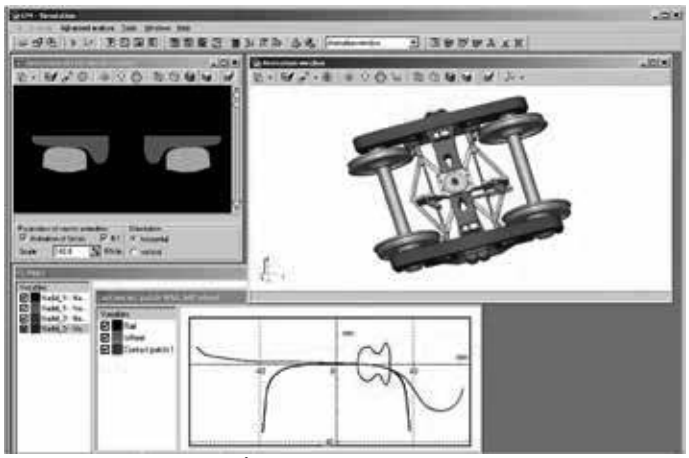
Trong phần mềm UM, tiếp xúc bánh xe - ray được mô phỏng trên cơ sở sử dụng biên dạng bánh xe và ray thực tế, kết hợp với mô hình lực tiếp xúc pháp tuyến và lực trượt tại vùng tiếp xúc. Bên cạnh đó còn mô tả chính xác chuyển động trượt giữa bánh xe và ray, cho phép phân tích chi tiết dao động ngang của bộ bánh xe. Cách tiếp cận này giúp mô phỏng một cách chính xác tương tác bánh xe - ray trong các điều kiện vận hành khác nhau, qua đó nâng cao độ tin cậy của các kết quả phân tích động lực học phương tiện đường sắt.



Hình 4. Mô phỏng tiếp xúc bánh xe - ray

2.3. Mô phỏng giá chuyển hướng toa xe hàng

Mô hình giá chuyển hướng gồm hai má giá, xà nhún, hệ lò xo trung ương sử dụng các tổ lò xo thép tròn có độ cứng theo ba phương và hệ thống giảm chấn nêm ma sát. Mô hình mô phỏng giá chuyển hướng được thể hiện trong Hình 5.

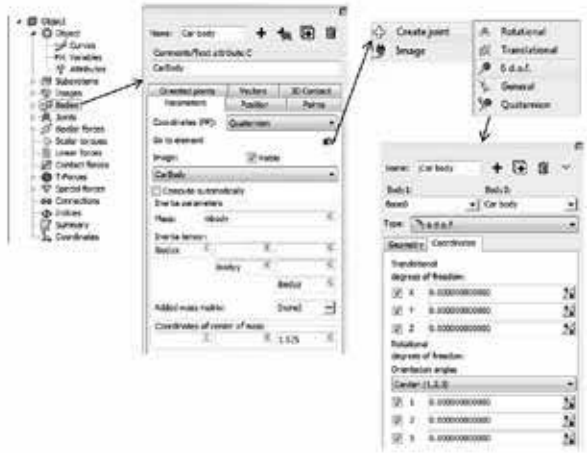


Hình 5. Mô phỏng giá chuyển hướng

2.4. Mô phỏng thân toa xe hàng

Mô hình thân toa xe bao gồm: dao động gật đầu, dao động ngang, dao động lăn ngang, dao động thẳng đứng và dao động lắc đầu. Như vậy mô hình động lực học của toa xe bao gồm 45 độ tự do. Mô hình thân toa xe được thể hiện trong Hình 6.

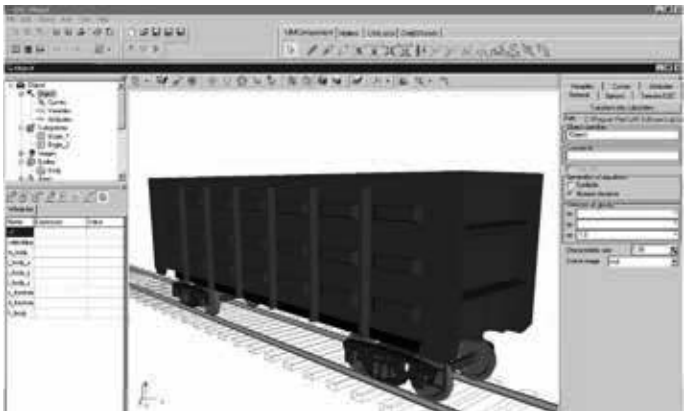
Hình 6. Mô hình thân toa xe



Hình 7. Thân toa xe và thiết lập các liên kết

2.5. Mô hình động lực học của toa xe hàng

Mô hình toa xe được xây dựng trong phần mềm UM bao gồm nhiều thành phần cơ bản nhằm mô phỏng đầy đủ đặc tính động lực học của hệ thống. Hệ cơ học của mô hình được cấu thành từ các cụm chi tiết được xây dựng như phần trên, bao gồm thân xe, má giá chuyển hướng, xà nhún, hệ thống treo. Thông qua việc thiết lập liên hết giữa các cụm chi tiết để tạo ra mô hình động lực học 3D như Hình 8.



Hình 8. Mô hình 3D tính toán động lực học của toa xe hàng

3. ĐÁNH GIÁ TÍNH NĂNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TOA XE KHI THÔNG QUA ĐƯỜNG CONG

Dùng phần mềm UM để khảo sát toa xe hàng thông qua đường cong bán kính 600 m, bao gồm đoạn đường thẳng, đường cong hòa hoãn, đoạn cong.

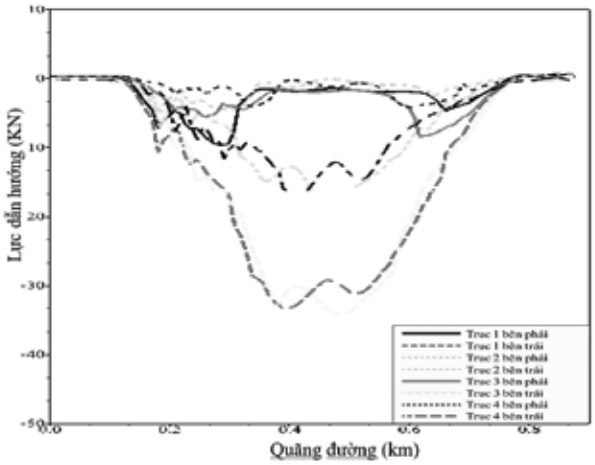
Bảng 2. Thông số đường cong mô phỏng

Bán kính đường cong [m]	Tốc độ [Km/h]	Độ siêu cao [mm]	Chiều dài đường thẳng [m]	Chiều dài đường cong hòa hoãn [m]	Chiều dài đường cong [m]
600	60	90	100	200	200

Bảng 3. Các chỉ tiêu an toàn khi thông qua đường cong [8]

Chỉ tiêu	Lực dẫn hướng [kN]	Lực thẳng đứng [kN]	Hệ số chống trật ray
Trị số cho phép	52	160	1.2

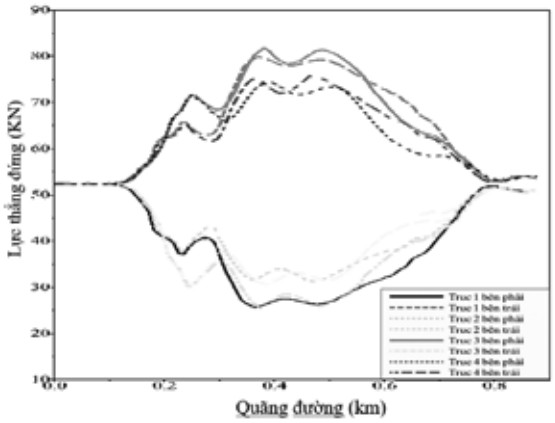
Kết quả lực dẫn hướng, lực thẳng đứng và hệ số trật ray như Hình 9, Hình 10 và Hình 11.



Hình 9. Lực dẫn hướng

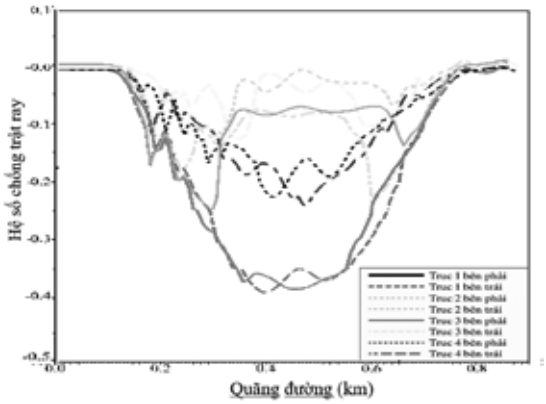
Trên Hình 9 có thể thấy, lực dẫn hướng của trục 1 và trục 3 là có giá trị lớn nhất bởi vì nó là các trục dẫn của toa xe và cụ thể nó là lực dẫn hướng phía bên trái của trục bánh xe 1 và trục bánh xe 3. Trị số lớn nhất của nó như tính toán là 33.51 kN, khi đó vẫn chưa lớn hơn trị số cho phép do đó vẫn thỏa mãn chỉ tiêu an toàn. Thông qua đồ thị thì vấn đề khi vào đường cong hòa hoãn thì xảy ra biến động về trị số lực dẫn hướng là lớn nhất, trị số lớn nhất là điểm cuối của

đường cong hòa hoãn bắt đầu vào đoạn cong đã được chứng minh. Và thực tế khi đoàn tàu đi vào đường cong hòa hoãn cũng dễ xảy ra trật ray nhất.



Hình 10. Lực thẳng đứng

Trên Hình 10 có thể thấy qui luật biến thiên lực thẳng đứng giữa bánh xe bên trái là ngược nhau. Tương tự như lực dẫn hướng thì trục 1 và trục 3 là có giá trị lớn nhất bởi vì nó là các trục dẫn của toa xe và cụ thể nó là lực thẳng đứng phía bên trái của trục bánh xe 1 và trục bánh xe 3. Trị số lớn nhất của nó như tính toán là 82.76 kN, khi đó vẫn chưa lớn hơn trị số cho phép do đó vẫn thỏa mãn chỉ tiêu an toàn.



Hình 11. Hệ số chống trật ray

Trên Hình 11 có thể thấy thấy qui luật biến đổi của hệ số chống trật ray giống như qui luật biến thiên của lực dẫn hướng. Do đó hệ số chống trật ray có giá trị lớn nhất ở phía bên trái trục 1 và trục 3. Giá trị lớn nhất là 0.396, phù hợp với chỉ tiêu an toàn.

4. KẾT LUẬN

Nội dung bào báo đã nghiên cứu ứng dụng phần mềm mô phỏng động lực học UM để mô phỏng mô hình tính toán động động lực học của toa xe hàng. Ứng dụng mô hình này để đánh giá tính năng động lực thông qua đường cong của toa xe. Qua kết quả tính toán thấy rằng các chỉ tiêu an toàn thông qua đường cong đều đạt tiêu chuẩn của đường sắt.

Phần mềm UM có thể được ứng dụng trong quá trình tính toán thiết kế phương tiện đường sắt, tính toán kiểm nghiệm để nâng cao tính năng động lực học của phương tiện đường sắt cho kết quả có độ tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] 李国芳、姚永明、丁旺才. 基于 UM 的车辆-轨道耦合动力学建模及仿真分析, 兰州交通大学学报, 第 5 期.131-139, 2016.

[2] 王树宏、高锋、高定刚, 基于 UM 仿真软件的高速磁浮列车轨道不平顺的动力学响应研究, 城市轨道交通研究，第 3 期.117-125, 2022.

[3]. 刘瑞家, 基于 UM 的地铁车辆轮轨磨耗预测及其动力学性能分析, 兰州交通大学, 硕士论文, 2021.

[4] Nguyễn Quang Hưởng, Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng một số tham số của đường cong đến hao mòn mặt lăn và gờ bánh xe toa xe hàng vận sdụng trên đường sắt Việt Nam, Luận văn Thạc sỹ khoa học kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2023.

[5] Nguyễn Hữu Dũng, Động lực học đoàn tàu, Nhà xuất bản giao thông vận tải, 2004.

[6] 王天福, 车辆系统动力学, 北京，中国铁道出版社, 1995.

[7]黄志辉, 轮对自由横动量对机车曲线通过性能的影响, 铁道机车与车辆, 第 3 期: 22-23, 1995.

[8] Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 08:2018 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khai thác đường sắt, Bộ Giao thông vận tải, 2018.

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu thiết kế hoán cải bộ phận chạy phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW để phục vụ thi công trên đường sắt mỏ

Research on the design of running gear modification for the ATLAS 1404 KZW railway specialized vehicle for construction on mine railways

> THS PHẠM HUY KHƯƠNG
Trường Đại học Giao thông vận tải; Email: huykhuonguct@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế hoán cải bộ phận chạy của phương tiện đường sắt chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW từ khổ đường sắt 1.435 mm sang khổ đường 1.000 mm để phục vụ thi công trên đường sắt mỏ. Tính toán kiểm nghiệm độ bền bộ trục bánh của phương tiện sau hoán cải.

Từ khóa: ATLAS 1404 KZW; đường sắt mỏ; phương tiện chuyên dùng; kiểm nghiệm độ bền.

ABSTRACT

This paper presents the research and redesign process of the running gear system of the ATLAS 1404 KZW special-purpose railway vehicle, regauged from standard gauge (1.435 mm) to metre gauge (1.000 mm) for operation on mining railways. The study also includes the structural strength verification of the wheelset assembly after modification.

Keywords: ATLAS 1404 KZW; mine railway; specialized vehicle; wheelset; strength verification.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

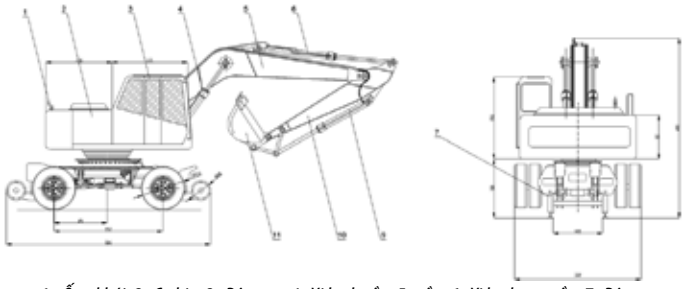
Phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW là loại máy chuyên dùng do hãng ATLAS của Cộng hòa Liên bang Đức chế tạo. Phương tiện đã qua sử dụng được nhập khẩu về Việt Nam để phục vụ thi công trên đường sắt mỏ. Tuy nhiên, phương tiện chỉ vận hành được trên đường sắt khổ 1.435 mm, không phù hợp với đường sắt khổ hẹp 1000 mm tại đường sắt mỏ. Xuất phát từ nhu cầu thực tế đó, phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW cần phải được thiết kế hoán cải bộ phận chạy từ khổ đường sắt 1.435 mm sang khổ đường sắt 1.000 mm để có thể phục vụ thi công trên đường sắt mỏ.

2. NỘI DUNG

2.1. Giới thiệu tổng quan về phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW trước cải tạo [5]

ATLAS 1404 KZW [5] là phương tiện chuyên dùng đường sắt dạng máy xúc - cần cẩu chạy ray, được sản xuất bởi hãng Atlas GmbH của Cộng hòa Liên bang Đức. Phương tiện được sử dụng trong công tác thi công, bảo trì và sửa chữa đường sắt như: đào, thay tà vẹt và đá ba lát; cẩu, lắp đặt ray, ghi và phụ kiện đường sắt; sửa chữa nền đường và ta luy; thu dọn vật liệu trên tuyến; hỗ trợ thi công và cứu viện đường sắt. Phương tiện có thể di chuyển trên cả đường ray và bánh lốp để làm việc trực tiếp trên tuyến.

ATLAS 1404 KZW có kích thước bao (Dài x Rộng x Cao): 7415 x 2560 x 4000 mm, sử dụng động cơ Diesel của hãng Deutz, công suất 69 kW, tốc độ quay lớn nhất 2.100 vòng/phút, khối lượng 19 tấn. Phương tiện sử dụng hệ thống di chuyển bánh lốp để chạy đường bộ và bộ bánh dẫn hướng ray để chạy trên đường sắt khổ đường ray 1.435 mm. Phương tiện có bán kính đào lớn nhất 8.495 mm



1- Ống khói; 2- Ca bin; 3- Động cơ; 4- Xi lanh cần; 5- cần; 6- Xi lanh tay gầu; 7- Bộ trục bánh sắt; 8- Ray; 9- Xy lanh gầu; 10- Tay gầu; 11- Gầu; 12- Bộ di chuyển bánh lốp

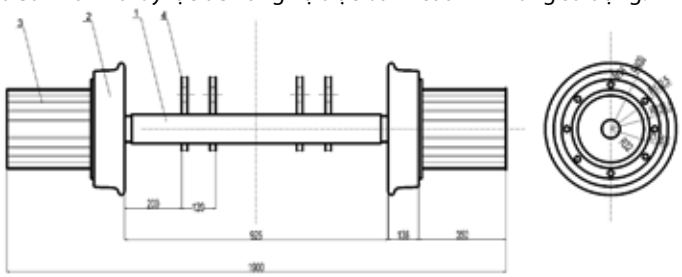
Hình 1. Kết cấu tổng thể phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW trước cải tạo

Hiện nay, phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW vẫn hoạt động bình thường khi di chuyển trên đường bộ và đường sắt khổ 1.435 mm. Tuy nhiên, phương tiện không thể vận hành trên đường sắt khổ 1.000 mm do khoảng cách trục bánh xe không phù hợp. Vì vậy, cần thiết kế và hoán cải bộ phận di chuyển của phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW từ khổ đường sắt 1.435 mm sang khổ đường sắt 1.000 mm nhằm phục vụ thi công trên đường sắt mỏ.

2.2. Thiết kế bộ phận chạy phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW

Để phương tiện có thể chạy trên khổ đường 1.000 mm cần thiết kế bộ trục bánh mới để khoảng cách trục phù hợp. Tuy nhiên, khi thay đổi khoảng cách trục của phương tiện, cũng cần phải thay đổi

cơ chế truyền động. Vì vậy, cần thiết kế thêm bánh ma sát là cơ cấu trung gian truyền chuyển động từ bánh lốp sang bánh sắt và giá treo xi lanh thủy lực để nâng hạ trục bánh sắt khi không sử dụng.

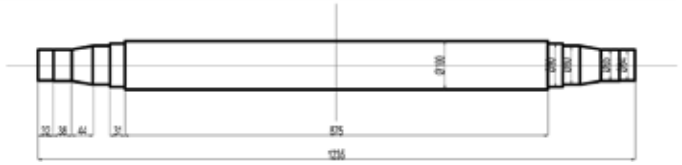


1- Trục xe; 2- Bánh xe; 3- Bánh ma sát; 4- Gía treo xi lanh thuỷ lực

Hình 2. Kết cấu bộ trục bánh sắt

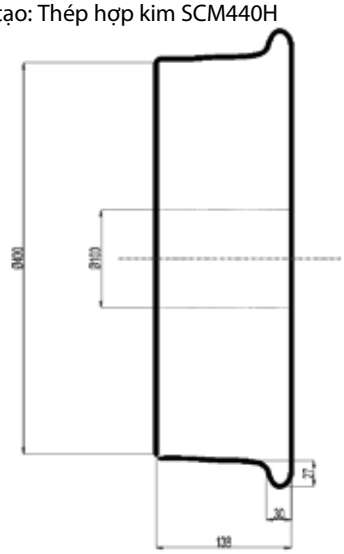
Bảng 1. Thông số kỹ thuật bộ trục bánh sắt phương tiện chuyên dùng đường sắt Atlas 1404 KZW

TT	Thông số kỹ thuật	Giá trị	Đơn vị
1	Tải trọng trục	9,5	tấn
2	Đường kính bánh xe	400	mm
3	Đường kính thân trục	100	mm
4	Vật liệu chế tạo trục xe	Thép hợp kim SCM440H	



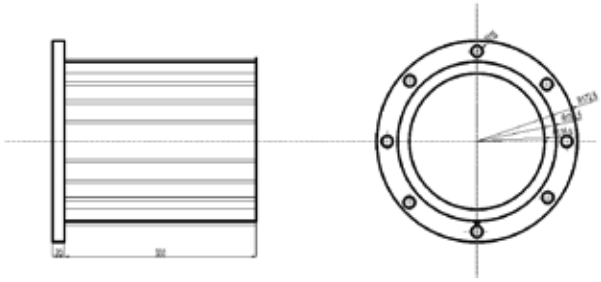
Hình 3. Kết cấu trục bánh xe

Vật liệu chế tạo: Thép hợp kim SCM440H



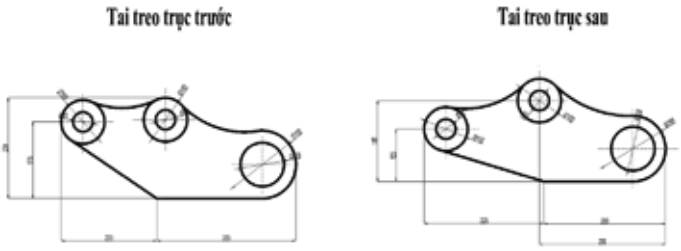
Hình 4. Kết cấu bánh xe

Vật liệu chế tạo: Thép hợp kim



Hình 5. Kết cấu bánh ma sát

Vật liệu chế tạo: Thép CT45



Hình 6. Kết cấu tai treo

Vật liệu chế tạo: Thép tấm CT45

2.3. Cải tạo cơ chế truyền động

+ Trước cải tạo: Phương tiện chạy trên khổ đường 1.435 mm. Tám bánh lốp đè lên hai ray là các bánh chủ động được truyền chuyển động từ động cơ diesel thông qua bộ truyền động thuỷ lực và các đăng. Bánh sắt chỉ làm nhiệm vụ dẫn hướng.

+ Sau cải tạo: Phương tiện chạy trên khổ đường 1.000 mm. Tám bánh lốp ở vị trí cao hơn bánh sắt, không tiếp xúc với ray. Bánh sắt tiếp xúc trực tiếp với ray là các bánh chủ động. Bánh lốp ép chặt lên bánh ma sát ở hai đầu bộ trục bánh xe thông qua cặp xi lanh thuỷ lực. Khi bánh lốp được truyền chuyển động từ động cơ thông qua bộ truyền động thuỷ lực và các đăng, bánh lốp sẽ truyền chuyển động lên bánh ma sát dẫn động bộ trục bánh sắt lăn trên ray.

2.4. Tính toán kiểm nghiệm độ bền bộ trục bánh phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW

Tính toán độ bền trục xe

a. Xác định tải trọng đặt lên trục

+ Tải trọng theo phương thẳng đứng: Bao gồm tải trọng bản thân tác dụng lên một bộ trục bánh xe:

$P_t = 9,5 . 1000 . 10 = 95000$, N

+ Tải trọng đặt lên một đầu trục: $P_{t2} = 95000/2 = 47500$, N

+ Xác định mô men xoắn tác dụng lên trục xe

- Lực cản di chuyển tính theo lý thuyết tính toán máy di chuyển trên đường sắt được xác định như sau:

$W_c = k_1.W_1 + W_2 + W_3 + W_4$, N [2] (1)

Trong đó : W_c - tổng lực cản di chuyển, N;

W_1 - lực cản do ma sát lăn và ma sát ổ trục, N;

W_2 - lực cản lên dốc, N;

W_3 - lực cản do gió, N;

W_4 - lực cản quán tính khởi động, N;

K_1 - hệ số kể đến lực cản do ma sát giữa mặt lăn bánh xe và ray, giữa ổ trục và cổ trục. K_1 chọn theo Bảng 3.6 [2], $K_1 = 2,4$.

- Lực cản ma sát theo công thức (3-40), [2]:

$W_1 = (G+Q).\frac{2.\mu+f.d}{D_{bx}}$,N (2)

Trong đó : G - trọng lượng xe khi làm việc, G=19.1000 . 9,81 = 186390, N;

Q - trọng lượng đất đá trong gầu, Q=0,8 . 1,4 . 104 = 11200, N;

D_{bx} - đường kính bánh xe bằng 400 mm;

d - đường kính ngõng trục lắp bánh xe d = 100 mm;

μ - hệ số ma sát lăn (bảng 3.7 [2] lấy bằng 0,4 cho trường hợp bánh thép);

f - hệ số ma sát trong ổ trục (Bảng 3-8 [2]), lấy bằng 0,015.

Thay vào công thức trên ta tính được :

$$W_1=(186390+11200).\frac{2.0,4+0,015.100}{400} = 1136,143, N.$$

- Lực cản do độ dốc trên đường ray tính theo công thức 3-41, [2]:

$W_2 = \alpha.(G+Q)$, N (3)

Với α : độ dốc của đường ray chọn bằng 0,002 theo bảng 3-9 [2];

Thay vào tính được :

$W_2 = 0,002.(186390+11200) = 395,18$, N

- Lực cản do gió tính theo công thức 1-2 [2]

$W_3 = K.q.F$, N (4)

Trong đó: K - hệ số cản khí động học, lấy bằng 1,1

q - áp lực gió bằng 250 N/m^2

F - diện tích chịu gió, sơ bộ lấy bằng 3,1 m^2, thay vào tính được : $W_3 = 825$ N

- Lực cản do quán tính theo công thức 3-42 [2] :

$W_4 = \frac{G+Q}{g} . \frac{v}{t_m}$, N (5)

Với : g = 9,8 m/s2

v = 1,389 m/s

t_m = 10s.

Thay vào công thức trên ta có :

$W_4 = \frac{186390+11200}{9,81} . \frac{1,389}{10} = 2797,681$ (N)

$W_c = 1136,143 + 395,18 + 825 + 2797,681 = 5154$ (N)

- Lực vòng tại bánh sắt tính từ lực cản di chuyển như sau :

$F_v = \frac{1}{4}.W_c. = 1288,5$ (N)

- Mô men uốn đặt lên một bánh sắt: M = Fv . D = 1288,5 . 0,4 = 515,4 N.m

b. Tính toán độ bền trục xe

Sử dụng phần mềm inventor tính toán độ bền trục xe:

* Khai báo vật liệu

Vật liệu chế tạo trục: Thép hợp kim SCM440H

Bảng 2. Các đặc trưng cơ bản của Thép hợp kim SCM440H

Thông số	Kí hiệu	Giá trị
Mô đun đàn hồi	E	206000 MPa
Mô đun độ cứng	G	80000 MPa
Tỉ trọng riêng	ρ	7860 kg/m^3
Tỉ trọng	ρ	7860 kg/m^3
Ứng suất kéo cho phép	$[\sigma]_k$	655 MPa
Ứng suất uốn cho phép	$[\sigma]_u$	415 MPa

* Đặt tải lên trục

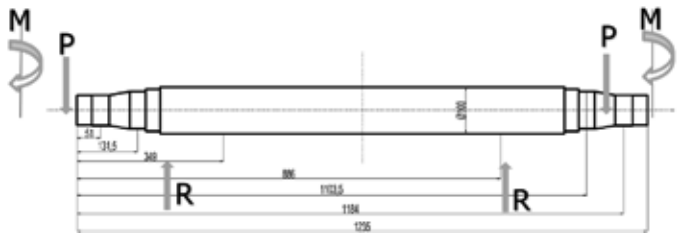
Bảng 3. Bảng tổng hợp tải trọng đặt lên trục

STT	Vị trí đặt	Lực thẳng đứng				Mô men xoắn
		Y	X	Giá trị	Hướng	
1	51 mm					515.400 N m
2	131.5 mm	-47500.000 N		-47500.000 N		
3	349 mm					-515.400 N m
4	886 mm					-515.400 N m
5	1103.5 mm	-47500.000 N		-47500.000 N		
6	1184 mm					515.400 N m

* Gối đỡ

Bảng 4. Bảng tổng hợp phản lực tác dụng lên gối đỡ

STT	Loại gối	Vị trí	Phản lực gối			
			Y	X	Giá trị	Hướng
1	Gối cố định	349 mm	-47174.676 N		47174.676 N	180 độ
2	Gối di động	886 mm	-47174.676 N		47174.676 N	180 độ

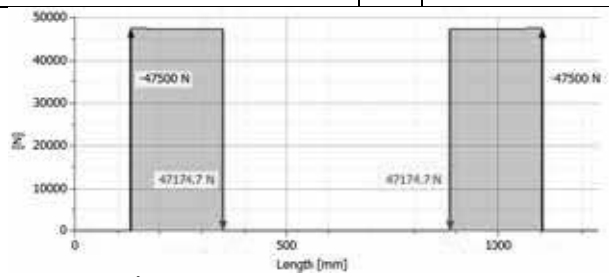


Hình 7. Sơ đồ đặt lực lên trục

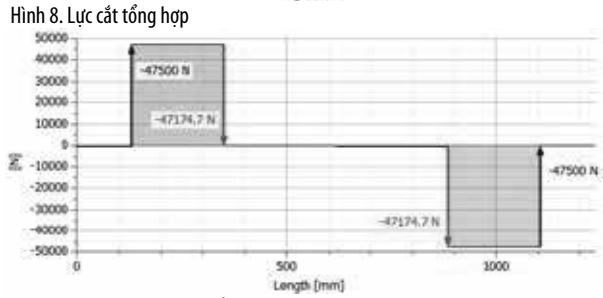
* Kết quả:

Bảng 5. Kết quả tính toán

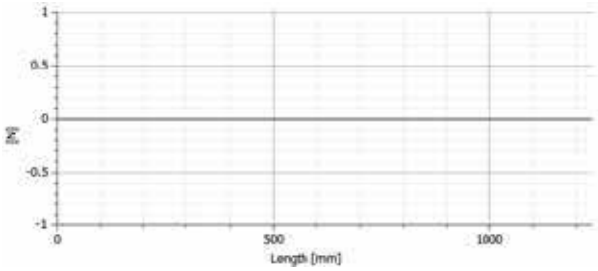
Chiều dài	L	1.235 mm
Khối lượng	m_t	66.348 kg
Ứng suất uốn lớn nhất	σ_B	105.215 MPa
Ứng suất cắt lớn nhất	τ_S	9.442 MPa
Ứng suất xoắn lớn nhất	τ	9.558 MPa



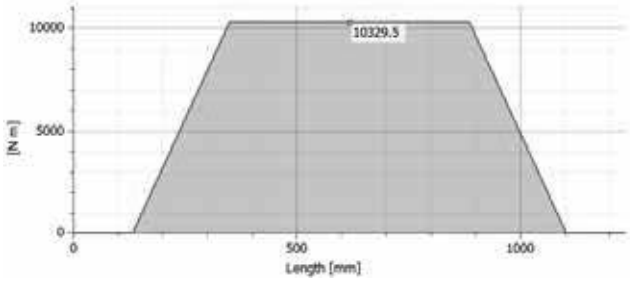
Hình 8. Lực cắt tổng hợp



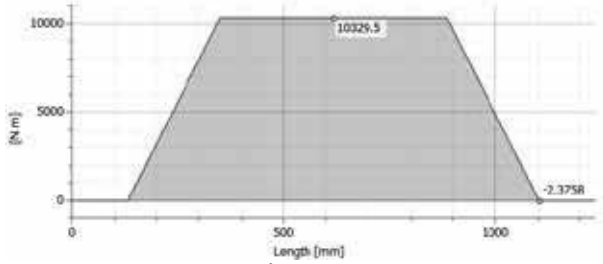
Hình 9. Lực cắt trong mặt phẳng XZ



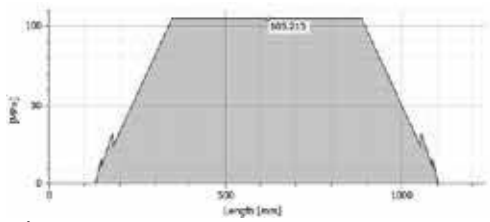
Hình 10. Lực cắt trong mặt phẳng XZ



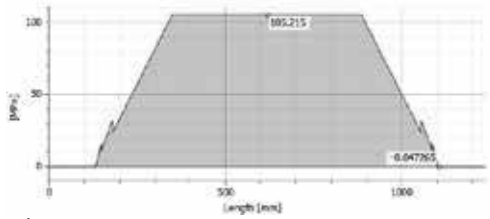
Hình 11. Mô men uốn tổng



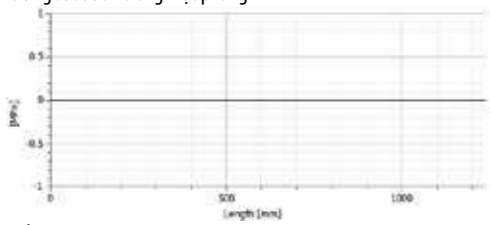
Hình 12. Momen uốn trong mặt phẳng YZ



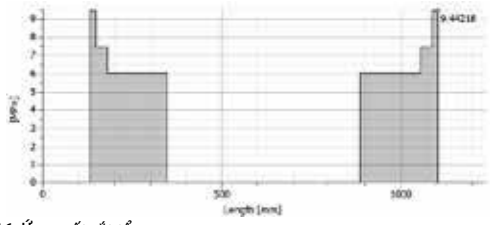
Hình 13. Ứng suất uốn tổng



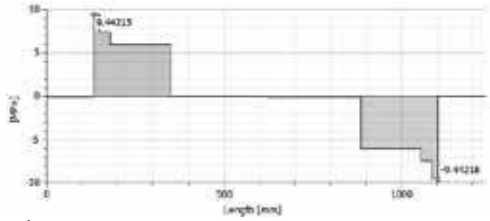
Hình 14. Ứng suất uốn trong mặt phẳng YZ



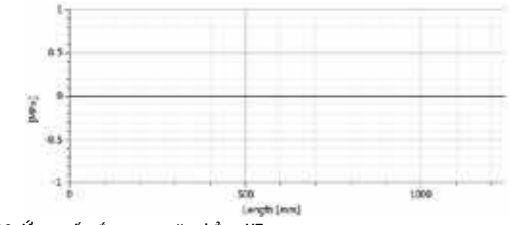
Hình 15. Ứng suất uốn trong mặt phẳng XZ



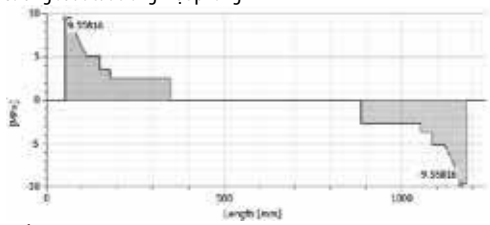
Hình 16. Ứng suất cắt tổng



Hình 17. Ứng suất cắt trong mặt phẳng YZ



Hình 18. Ứng suất cắt trong mặt phẳng XZ



Hình 19. Ứng suất xoắn tổng:

Từ các bảng tổng hợp kết quả nội lực và ứng suất, so sánh với ứng suất cho phép [σ] = 415 Mpa trục xe luôn đảm bảo độ bền.

c. Tính toán, kiểm nghiệm độ bền bánh xe

Quá trình làm việc của bánh xe chủ yếu hỏng do dập, vì vậy cần thiết tính toán độ bền bánh sắt theo ứng suất dập cho phép.

* Kích thước bánh xe:

+ Đường kính D= 400 mm,

+ Bề rộng bánh xe: b=138 mm

* Tính toán

- Tải trọng lớn nhất tác dụng lên bánh xe:

$$P_{max} = \frac{G}{4} = \frac{19000 \,.\, 9{,}81}{4} = 46597{,}5\ (N)$$

- Tải trọng tương đương :

$$P_{td} = \gamma . K_{bx} . P_{max}\ , N \qquad (6)$$

Trong đó : γ - hệ số liên quan đến sự thay đổi của tải trọng xác định theo công thức

$$\gamma = \sqrt{[\frac{1}{2}.(1+\frac{1}{(1+\frac{Q}{G})^3})]} \qquad (7)$$

Trong đó : Q - Trọng lượng của vật liệu trong gầu.

$Q = V.\gamma_{vl}$, N

+ γ_{vl} - Trọng lượng của 1m^3 vật liệu, γ_{vl} = 1,8 tấn

+ V – Thể tích gầu, V=0,8 m^3

Q = 0,8 . 1,8 . 1000 . 9,81 = 14126,4 (N)

G - Trọng lượng máy, G = 1900 .9,81 = 18639 (N)

Thay vào công thức trên ta có : $\gamma = 0{,}769$

K_{bx} = 1,2 : hệ số phản ánh chế độ làm việc, tra trong bảng 3-12 [2]

Thay vào công thức trên ta có : $P_{td} = 43000{,}173$ (N)

Quá trình làm việc của bánh xe chủ yếu hỏng do dập, vì vậy cần thiết tính toán cho bánh sắt theo ứng suất dập cho phép sao cho thỏa mãn biểu thức sau đây:

$$\sigma_d = 190.\sqrt{\frac{P_{td}}{b.r}} \qquad (8)$$

Trong đó : b - chiều rộng bánh xe, b = 138 mm

r - bán kính bánh xe, r= 200 mm

Thay vào ta được

$\sigma_d = 237{,}156$ (N/mm^2) < $[\sigma_d]$ = 750 (N/mm^2)

Bánh xe thỏa mãn điều kiện làm việc của máy.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu và đề xuất phương án thiết kế hoán cải bộ phận chạy của phương tiện chuyên dùng đường sắt ATLAS 1404 KZW từ khổ đường 1.435 mm sang khổ đường 1.000 mm nhằm phục vụ thi công trên đường sắt mỏ. Kết quả nghiên cứu cho thấy kết cấu bộ trục bánh sắt sau hoán cải đáp ứng các yêu cầu về độ bền và điều kiện làm việc. Các ứng suất tính toán trong trục xe và bánh xe đều nhỏ hơn giới hạn cho phép của vật liệu. Phương án truyền động ma sát được đề xuất tận dụng được hệ thống truyền động sẵn có của máy và phù hợp với điều kiện khai thác thực tế. Kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi của phương án hoán cải và có thể áp dụng trong thực tế nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng các phương tiện chuyên dùng phục vụ thi công trên đường sắt mỏ khổ hẹp tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vũ Thế Lộc và Vũ Thanh Bình, Máy làm đất, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội, 1997.

[2] Vũ Thanh Bình và Nguyễn Đăng Điệm, Truyền động máy xây dựng, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội, 1999.

[3] Nguyễn Văn Hợp, Tính toán máy trục, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội.

[4] Nguyễn Đình Đức và Đào Như Mai, Sức bền vật liệu và kết cấu, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, 2011.

[5] Atlas GmbH, ATLAS 1404 KZW Rail-Road Excavator Technical Manual, Atlas GmbH, Germany, 2005.

■Ngày nhận bài: 07/4/2026 ■Ngày sửa bài: 17/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Áp dụng thuật toán ma trận để tối ưu tính toán thời gian thi công theo phương pháp dây chuyền

Application of a matrix algorithm to optimize the calculation of construction duration in flow-line construction organization

> BÙI VĂN TUYÊN
Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ Văn Lang, Trường Đại học Văn Lang
Email: tuyen.bv@vlu.edu.vn

TÓM TẮT

Công tác lập kế hoạch tiến độ xây dựng cho phép dự án đạt được hiệu quả cao trong việc sử dụng các nguồn lực như vật tư, kỹ thuật, nhân công, máy móc và thiết bị lao động. Điều này giúp đảm bảo dự án đi vào hoạt động một cách đồng đều và liên tục. Đặc biệt, việc sử dụng phương pháp dây chuyền trong tổ chức thi công giúp các công việc được thực hiện một cách tuần tự trên các phân đoạn và hạng mục khác nhau. Nghiên cứu này trình bày phương pháp tính toán thời gian thi công dựa trên thuật toán ma trận, nhằm tối ưu hóa việc tính toán thời gian thi công trong việc tổ chức thi công theo phương pháp dây chuyền, cho phép đánh giá trước thời gian thực hiện của từng công tác, xác định trình tự xây dựng công trình một cách hợp lý nhất, theo dõi và điều chỉnh các dây chuyền thi công theo thời gian thực, đồng thời đánh giá mô hình tổ chức thi công công trình đã lựa chọn dưới góc độ mức độ chồng chéo và mức độ tập trung của các quá trình sản xuất. Nghiên cứu này góp phần thúc đẩy việc áp dụng các thuật toán vào công tác lập tiến độ, tổ chức thi công.

Từ khóa: Thuật toán ma trận; tổ chức thi công theo dây chuyền; thời gian thi công; tính liên tục.

ABSTRACT

Construction scheduling allows a project to achieve high efficiency in the use of resources such as materials, technology, labor, machinery, and equipment. This helps ensure that the project operates in a uniform and continuous manner. In particular, the use of the flow-line method in construction organization helps tasks to be carried out sequentially across different segments and work items. This study presents a method for calculating construction duration based on a matrix algorithm, aiming to optimize the calculation of construction time in flow-line construction organization, allowing the prior evaluation of the execution time of each activity, determining the construction sequence in the most reasonable way, monitoring and adjusting construction workflows in real time, and at the same time evaluating the selected construction organization model in terms of the degree of overlapping and the level of concentration of production processes. This study contributes to promoting the application of algorithms in construction scheduling and construction organization.

Keywords: Matrix algorithm; flow-line construction; construction duration; continuity.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mục tiêu của bài báo là đề xuất phương pháp tiếp cận trong công tác lập kế hoạch và tính toán các tham số của quá trình thi công dựa trên việc xây dựng thuật toán ma trận. Giả thuyết nghiên cứu cho rằng hiệu quả của các quá trình tổ chức và công nghệ trong sản xuất xây dựng có thể được nâng cao thông qua việc phát hiện và loại bỏ các khoảng thời gian gián đoạn giữa các quá trình thực hiện liên tiếp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung giải quyết các nhiệm vụ sau: (i) xác định các quy luật của quá trình thi công; (ii) xác định trình tự thực hiện công việc hợp lý tại các phân đoạn (hạng mục thi công) khác nhau; (iii) xác định các hệ số nhằm đánh giá hiệu quả của mô hình tổ chức thi công được lựa chọn.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Theo [1], tổ chức thi công theo dây chuyền trong xây dựng là sự kết hợp phương pháp tuần tự và song song một cách logic nhằm khắc phục các điểm yếu, phát huy những điểm mạnh. Bản chất của phương pháp này là một phương pháp tổ chức sản xuất mà đối tượng thi công được chia ra làm nhiều phần nhỏ được gọi là các phân đoạn, bên cạnh đó quá trình xây lắp tổng thể được phân chia thành các quá trình bộ phận. Mỗi công việc do một tổ chuyên môn

hóa thực hiện và lần lượt triển khai qua các phân đoạn. Từ đó sẽ hình thành dây chuyền thi công. Chính vì vậy phương pháp này sẽ có những ưu và nhược điểm rõ ràng. Ưu điểm nhờ có sự chuyên môn hóa tương đối cao và các phân đoạn phối hợp với nhau tương đối nhịp nhàng tạo nên một điểm đặc trưng cơ bản cho phương pháp. Bên cạnh đó phương pháp dây chuyền sẽ giúp việc kiểm soát chất lượng, chi phí lao động một cách dễ dàng và hợp lý hơn, cũng như toàn bộ thời gian của dự án sẽ được kiểm soát và đảm bảo tiến độ. Bên cạnh đó, vẫn phải kể đến các nhược điểm lớn của phương pháp dây chuyền như sau một thời gian ngắn hạn cần phải tổ chức lại để xây dựng một công trình khác do tính chất đơn lẻ và sản phẩm xây dựng tương đối đa dạng dẫn tới thời gian không được ổn định lâu dài. Tổ chức thi công theo dây chuyền trong xây dựng được đặc trưng bởi hai đặc điểm cơ bản là tính cố định và sự phát triển tương đối chậm của dây chuyền cũng như tính ngắn hạn của nó trong điều kiện của từng công trường xây dựng riêng lẻ. Thời kỳ bắt đầu triển khai công việc (T_{bd}) là giai đoạn các quá trình mới được đưa vào thực hiện một cách tuần tự; ngược lại, thời kỳ kết thúc (T_{kt}) là giai đoạn các quá trình đó dần thu hẹp và giảm xuống theo thời gian. Khi số lượng phân đoạn (hạng mục thi công) ít trong khi thời gian thực hiện mỗi quá trình lại kéo dài, chuỗi thi công chưa kịp triển khai đồng bộ thì đã bước sang giai đoạn kết thúc. Khi đó, các quá trình khởi đầu đã hoàn thành trước cả khi những quá trình cuối cùng được bắt đầu. Tức là:

$$T_{bd} + (T_{kt}) > T$$

Theo [2], I.I. Vladimirov cho rằng việc xây dựng các dây chuyền thi công hiệu quả (dây chuyền dài hạn) bao phủ nhiều công trường (phân đoạn thi công) là một nhiệm vụ tổ chức phức tạp. Với hình thức tổ chức này, nhiều công việc được thực hiện đồng thời trên các hạng mục khác nhau, dẫn đến sự chồng chéo giữa các quá trình. Mức độ chồng chéo có thể thay đổi tùy thuộc vào số lượng hạng mục. Từ đó có thể thấy rằng mức độ chồng chéo của các quá trình trong tổ chức thi công theo dây chuyền là một yếu tố quan trọng, ảnh hưởng đáng kể đến tổng thời gian của dự án.

3. THUẬT TOÁN MA TRẬN VÀ VÍ DỤ ÁP DỤNG

Nhằm rút ngắn tổng thời gian thi công (T), trong điều kiện cho phép cần tổ chức kết hợp thực hiện các quá trình liền kề. Các tham số của dây chuyền thi công có sự kết hợp công việc này có thể được xác định thông qua thuật toán ma trận. Việc xác định trình tự thi công hợp lý cho các công trình cao tầng bằng cách sử dụng ma trận là một phương pháp hiệu quả để tối ưu hóa công việc, nâng cao năng suất lao động, giảm giá thành sản phẩm xây dựng, rút ngắn tổng thời gian xây dựng và nâng cao chất lượng xây dựng. Đối với các dây chuyền có nhịp điệu, phép tính được thực hiện từ trên xuống dưới hoặc ngược lại từ dưới lên trên trong mỗi cột, tùy thuộc vào tổng thời gian của cả quá trình vì các quá trình được liên kết với nhau bởi điểm bắt đầu hoặc điểm kết thúc. Đối với các dây chuyền không tuân theo nhịp điệu, phép tính còn có thể thực hiện từ phần đầu đến phần cuối hoặc ngược lại, ngoài ra cũng có thể bắt đầu từ bất kỳ phần nào trong quá trình theo cả hai hướng trên xuống hoặc dưới lên. Khi thực hiện theo hướng từ trên xuống, thu được thời gian kết thúc chính bằng thời gian bắt đầu cộng với thời gian quá trình thực hiện. Ngược lại nếu thực hiện theo hướng từ dưới lên, lấy thời gian kết thúc trừ đi thời gian thực hiện, thu được thời gian bắt đầu.

Thuật toán ma trận không chỉ mang lại sự đơn giản trong việc tính toán mà còn thu lại được kết quả của cả dây chuyền một cách toàn diện và nhanh chóng, tổng thời gian của toàn bộ dây chuyền có thể thu được ngay sau khi thực hiện tính toán xong.

Trong ma trận, các hàng thể hiện các khu vực thi công (hạng mục), còn các cột thể hiện các tổ thi công (các đội thi công). Các ô trong ma trận ghi thời gian làm việc của từng tổ thi công tại các khu vực tương ứng, chính là thời gian bắt đầu và kết thúc. Ở cuối mỗi cột, tại góc dưới cùng, thể hiện thời gian kết thúc của một quy trình cụ thể, và ở ô đầu tiên của cùng cột đó, tại góc trên cùng, thể hiện thời gian bắt đầu của quy trình đó. Ở cuối mỗi hàng, trạng thái hoàn thành của mỗi phần (hạng mục), được tính từ thời điểm bắt đầu xây dựng. Phương pháp này cho phép tổ chức công việc một cách hợp lý, đảm bảo hiệu quả và tuân thủ tiến độ thực hiện dự án. Các tham số thời gian cơ bản bao gồm: t_{ij} nhịp làm việc của tổ đội hoặc nhịp của dây chuyền thi công bộ phận, biểu thị thời gian làm việc của tổ đội i trên hạng mục j.

Các phân đoạn thi công (K) là những hạng mục làm việc trên mặt bằng, nơi các tổ đội thực hiện một dây chuyền công việc riêng biệt xác định. Mỗi phân đoạn được xem là một đơn vị đặc trưng của sản phẩm xây dựng tương ứng với dây chuyền công việc đó. Số lượng phân đoạn mà công trình có thể chia trên mặt bằng phụ thuộc vào giải pháp kết cấu cũng như giải pháp quy hoạch không gian của công trình.

Hệ số mật độ $K_{mđ}$ của ma trận được xác định bằng tỷ số giữa tổng thời gian làm việc thực tế của các tổ thi công tại các khu vực so với tổng thời gian bao gồm cả thời gian dừng do các nguyên nhân tổ chức (chưa có mặt bằng sẵn sàng, chờ đợi, v.v.), được tính theo công thức:

$$K_{mđ} = \frac{\sum_1^K \sum_1^n t_i}{\sum_1^K \left(\sum_1^n t_i + \sum t_{op}\right)}$$

Hệ số kết hợp các quá trình K_{qt} phản ánh mức độ chồng chéo trong tổ chức thi công. Giá trị này được tính bằng cách lấy tổng thời gian lao động của tất cả các quá trình trên các phân đoạn (hoặc công trình), trừ đi thời hạn xây dựng (T), sau đó đem phần chênh lệch đó chia cho chính tổng thời gian lao động ban đầu, được tính theo công thức:

$$K_{qt} = \frac{\sum_1^K \sum_1^n t_i - T}{\sum_1^K \sum_1^n t_i}$$

Trong giới hạn, cả hai hệ số đều tiến dần tới giá trị bằng một. Mức độ lấp đầy của ma trận càng cao và mức độ kết hợp giữa các quá trình càng lớn thì chất lượng tổ chức của dòng thi công không nhịp điệu càng được nâng cao.

Ở góc trên bên trái của ô trong ma trận ghi thời điểm bắt đầu thực hiện công việc tại hạng mục thi công t_{ij}^n, còn ở góc dưới bên phải ghi thời điểm hoàn thành công việc được tính theo công thức: $t_{ij}^s = t_{ij}^p + t_{ij}$

Trong hàng bổ sung ở cuối ma trận, Σt_{ij}^p là tổng thời gian làm việc của mỗi tổ thi công tại các hạng mục và các khoảng gián đoạn trong tổ chức lớn nhất maxΣt_{on}.

Để làm rõ được thuật toán này, tác giả đưa ra một ví dụ, dựa trên phương án ban đầu về trình tự xây dựng các hạng mục, thời gian của dây chuyền công việc không đồng đều sẽ được xác định và thể hiện dưới dạng ma trận (Bảng 1).

Ở bước đầu tiên của quá trình tính toán, việc tính toán ma trận được thực hiện từ trên xuống dưới, giả định rằng tất cả các công việc đều bắt đầu tại khu vực thi công đầu tiên từ mốc thời gian bằng không.

Ở bước thứ hai, từ thời điểm kết thúc của công việc trước đó, xác định khả năng bắt đầu công việc liền kề tại từng hạng mục thi công. Để làm điều này, cần so sánh thời điểm kết thúc của công việc trước và thời điểm bắt đầu của công việc tiếp theo tại mỗi khu vực thi công.

Ở bước thứ ba, bằng cách hiệu chỉnh thời điểm bắt đầu công việc của các tổ thi công tại từng khu vực, dựa trên các khoảng gián đoạn tổ chức đã xác định, tiến hành tính toán cuối cùng cho dây chuyền công việc không đồng đều.

Bảng 1. Kết quả tính toán dây chuyền công việc không đồng đều đối với phương án ban đầu về trình tự xây dựng công trình

Hạng mục thi công	Tổ thi công				$\frac{\Sigma t_{ij}}{\sum t_{ij} + \sum t_{op}}$	$\frac{\sum t_{ij}^{p}}{\sum t_{ij}^{s}}$	Δt_{ij}
	1	2	3	4			
1	0 51 x 51	0;51 0 70 x 51 70;121	0;183 62 89 x 70 89;272	0;272 0 73 89 73;345	283/345	51/162	-22
2	51 53 x 104	70;121 17 83 x 34 153;204	89;272 68 54 x 64 143; 236	73;345 19 66 70 139;411	256/360	53/120	-14
3	104 57 x 161	153;204 43 91 x 8 244;295	143;236 31 52 x 101 195;378	139;411 33 37 56 176;448	237/344	57/89	20
4	161 16 x 177	244;295 118 83 x -67 327;378	195;378 0 46 x 132 241;424	176;448 24 65 65 241;513	210/352	16/111	-49
$\sum t_{ij}$	177	327	241	241	$K = \frac{283+256+237+210}{345+360+344+352} = 0.70$		
maxt_{op}	52	132	89				

Trong ví dụ này: tại hạng mục thi công thứ nhất, tổ thi công thứ nhất hoàn thành công việc vào thời điểm là 51 đơn vị thời gian, trong khi thời điểm của tổ thứ hai bắt đầu công việc là 0. Do đó, cần lùi thời điểm bắt đầu công việc của tổ thứ hai lại 51 - 0 = 51 đơn vị thời gian, và giá trị này được ghi vào ô (1-2) gần đường phân cách giữa hai công việc liền kề.

Tương tự, xác định giá trị cho tất cả các hạng mục thi công và ghi lại giá trị lớn nhất trong số các khoảng gián đoạn tổ chức giữa từng cặp công việc liền kề vào hàng bổ sung ở cuối ma trận.

Với hai công việc liền kề đầu tiên, 3 đơn vị thời gian là khoảng gián đoạn tổ chức lớn nhất. Do đó, tổ thứ hai sẽ bắt đầu công việc của hạng mục thi công thứ nhất tại thời điểm là 51; của tổ thứ ba là: 51 + 183 = 234; của tổ thứ tư là: 234 + 89 = 323. Các thời điểm bắt đầu đã điều chỉnh được ghi vào ma trận, ngay bên cạnh các thời điểm bắt đầu giả định ban đầu (phân cách bằng dấu chấm phẩy ";"). Từ đó, tiến hành tính toán tổng thể thời gian của dây chuyền công việc không đồng đều. Tổng thời gian thực hiện là 513 đơn vị thời gian. Hệ số mật độ K phản ánh mức độ sử dụng mặt bằng công việc của các tổ thi công, là 0,7.

Bằng cách so sánh thời điểm bắt đầu công việc tiếp theo tại một hạng mục thi công cụ thể với thời điểm hoàn thành công việc trước đó, thời gian gián đoạn tổ chức thi công đã được xác định. Các giá trị này được ghi trong các ô của ma trận, bên cạnh ký hiệu 'x', giúp đảm bảo tính minh bạch và độ chính xác trong quá trình phân tích.

Để xác định trình tự thi công hợp lý của các hạng mục công trình, trước tiên cần tính tổng thời gian làm việc của từng tổ thi công trên tất cả các hạng mục thi công, ký hiệu là Σt_{ij}.

Các giá trị thu được được ghi vào hàng bổ sung bên dưới trong ma trận. Trong số đó, cần xác định công việc có tổng thời gian dài nhất trên tất cả các hạng mục, đó là các công việc do tổ thi công thứ hai thực hiện. Trong ví dụ này có tổng thời gian là 327 đơn vị thời gian.

Tổng thời gian của các công việc trước (tức là trước công việc dài nhất về tổng thời gian) - giá trị này được ghi ở tử số. Tổng thời gian của các công việc sau - ghi ở mẫu số. Ngoài ra, tính độ lệch Δt_{ij} giữa thời gian của công việc đầu tiên và công việc cuối cùng (trên tuyến trình tự công việc), phản ánh mức chênh lệch về thời lượng giữa các tổ công việc, giúp đánh giá mức độ cân bằng của chuỗi thi công. Ma trận mới được xây dựng theo một trình tự xác định rõ ràng (Bảng 2). Hàng đầu tiên ghi số hiệu của khu vực thi công (khu vực bắt đầu), nơi tổng thời gian của các công việc trước dây chuyền dẫn đầu (dây chuyền chủ đạo) là nhỏ nhất. Hàng cuối cùng ghi số hiệu của khu vực mà tổng thời gian của các công việc sau dây chuyền dẫn đầu là nhỏ nhất. Tiếp theo, theo thứ tự tương tự, điền hàng thứ hai và hàng áp chót, rồi lần lượt điền các hàng còn lại. Quá trình điền được thực hiện sao cho tổng thời gian các công việc trước và sau sẽ tăng dần khi tiến về trung tâm của ma trận, từ đó tạo nên một cấu trúc hài hòa, phản ánh sự cân đối trong tổ chức trình tự thi công. Ma trận mới được hình thành sẽ được tính toán để xác định thời gian thi công tổng thể của các hạng mục công trình. ma trận mới dựa trên chỉ số thứ hai Δtij, phản ánh chênh lệch về nhịp độ làm việc giữa tổ thi công đầu tiên và tổ cuối cùng tại mỗi khu vực thi công. Ở hàng đầu tiên của ma trận, ghi số hiệu của khu vực có độ lệch nhịp độ nhỏ nhất. Các hàng tiếp theo được sắp xếp theo thứ tự tăng dần của giá trị Δtij. Sau khi hoàn tất việc điền ma trận theo chỉ số này, tiến hành tính toán tổng thể để phục vụ phân tích và so sánh, giúp đánh giá thêm hiệu quả tổ chức theo một góc nhìn khác - mức độ cân bằng giữa các tổ thi công trong dây chuyền công việc.

Bảng 2. Kết quả tính toán dây chuyền công việc không đồng đều theo phương án cải tiến về trình tự xây dựng các hạng mục công trình, có sử dụng chỉ số đánh giá $\frac{\sum t_{ij}^{p}}{\sum t_{ij}^{s}}$ và Δt_{ij}

Hạng mục thi công	Đội thi công				$\frac{\Sigma t_{ij}}{\sum t_{ij} + \sum t_{op}}$
	1	2	3	4	
1	0 16 x 16	0;68 -52 83 x -16 153;221	0;216 -65 46 x 70 46;262	0;293 -31 65 46 65;358	210/333
2	16 51 x 67	83;151 -84 70 x -16 153;221	46;262 -41 89 x 107 135; 351	65;358 -7 74 70 139;432	284/455
3	67 85 x	153;221 -69 88 x	135;351 -42 47 x	139;432 -34 37	257/375

	152	-1 241;309	106 182;398	43 176;469	
4	152 59 x 211	241;309 -98 88 x -30 329;397	182;398 -1 55 x 147 237;453	176;469 -16 68 61 244;537	$\frac{270}{410}$
$\sum t_{ij}$	211	329	237	244	$K = \frac{1021}{1573} = 0.65$
maxt_{op}	68	148	77		

Trong ví dụ này, thời gian thi công theo ma trận mới là 537 đơn vị thời gian, tức là tăng 24 đơn vị so với thời gian dây chuyền công việc theo trình tự ban đầu.

Cách tiếp cận này cho phép đánh giá hiệu quả của các thay đổi trong quá trình lập kế hoạch và tổ chức thi công, giúp đưa ra quyết định tối ưu về trình tự xây dựng nhằm cân bằng giữa tiến độ, tài nguyên và tính khả thi tổ chức.

4. THẢO LUẬN

Dựa trên kết quả tính toán từ các ma trận, trình tự thi công tối ưu nhằm đạt được thời gian thực hiện dây chuyền công việc ngắn nhất là: 4, 1, 2, 3. Trong phương án này, hệ số mật độ *K*=0.7 cho thấy mức độ phối hợp công việc tại các hạng mục thi công đã được cải thiện đáng kể so với các phương án trình tự khác. Điều này phản ánh hiệu quả cao hơn trong việc tổ chức thi công, góp phần rút ngắn tiến độ và nâng cao hiệu suất triển khai dự án.

Nhằm đẩy nhanh quá trình tại một số ô nhất định, cần phải xét đến việc đó sẽ ảnh hưởng như thế nào đến tổng thời gian xây dựng. Đồng thời cần lưu ý rằng việc tăng tốc quá trình trong một số trường hợp liên quan đến việc tăng số lượng công nhân, điều này không phải lúc nào cũng khả thi và hợp lý.

Việc điều chỉnh các dây chuyền thi công không nhịp điệu trong quá trình hình thành và thực hiện cần xác định các ô tiềm năng dựa vào việc phân tích ma trận. Các ô này có thể được chia thành hai nhóm. Nhóm thứ nhất gồm những ô cho phép, trong giới hạn nhất định, kéo dài thời gian của quá trình thi công tại thời điểm đó mà không làm thay đổi thời gian thi công tổng thể đã tính toán; trong một số trường hợp, thậm chí còn có thể góp phần rút ngắn thời gian này. Nhóm thứ hai (có thể trùng với nhóm thứ nhất) là những ô mà nếu rút ngắn thời gian quá trình ghi trong đó thì có thể làm tăng hoặc trường hợp tốt nhất là giữ nguyên tổng thời gian thi công. Khi đó, việc tăng tốc quá trình là không hợp lý. Các ô tiềm năng cho phép làm chậm quá trình khi cần thiết nhằm tạo điều kiện trong quá trình thi công, có thể tổ chức giảm số lượng nhân công mà không làm kéo dài tổng thời gian. Có thể xác định được trước những ô này trên ma trận dựa theo các nguyên tắc sau:

Trong ma trận, ở cột thứ nhất, các ô tiềm năng nằm bên dưới đường chuyển tự do sang cột kế bên bên phải (được ký hiệu bằng dấu gạch ngang "-"). Độ gián đoạn cho phép của quá trình được xác định bằng giá trị nhỏ nhất của khoảng cách () với quá trình tiếp theo tại chính ô đó hoặc tại bất kỳ ô nào phía dưới.

- Trong ma trận, ở cột cuối cùng, các ô tiềm năng nằm phía trên đường chuyển tự do từ cột kế bên bên trái. Độ gián đoạn cho phép được xác định bằng giá trị nhỏ nhất của khoảng cách với quá trình trước đó tại ô tương ứng hoặc tại bất kỳ ô nào phía trên.

- Trong ma trận, ở cột cột trung gian, ô tiềm năng là những ô nằm phía trên đường chuyển tự do từ cột bên trái sang, hoặc phía dưới đường chuyển từ cột này sang cột bên phải. Giá trị giới hạn trong trường hợp này được xác định theo nguyên tắc nêu tại 2 bước trên.

Khi cần đẩy nhanh một quá trình tại các ô nhất định, trước hết cần đánh giá tác động của việc này đến tổng thời gian thi công. Đồng thời, cần lưu ý rằng việc tăng tốc thường đi kèm với yêu cầu tăng số lượng nhân công, điều này không phải lúc nào cũng khả thi hoặc hợp lý về mặt tổ chức.

Tại thời điểm đánh giá, nếu phát hiện một công việc bị chậm trễ, cần sử dụng phương pháp dự báo để xác định một mốc thời gian đánh giá mới. Phần ma trận tương ứng với khoảng thời gian đã thực hiện được loại bỏ khỏi tính toán.

Đối với những ô trong ma trận mà thời điểm bắt đầu quá trình không trùng với ngày đánh giá, cần tiến hành điều chỉnh. Thông qua việc rút ngắn thời lượng, quá trình được hiệu chỉnh để phù hợp với mốc khởi đầu chung đã xác định.

Việc tính toán lại ma trận được thực hiện cho tất cả các cột, ngoại trừ những cột không chịu ảnh hưởng của đường ghi nhận thông tin. Thời gian tính toán mới thu được sẽ được cộng với thời gian của phần ma trận đã loại bỏ, sau đó so sánh với thời gian thi công tính toán ban đầu.

5. KẾT LUẬN

Như vậy, phương pháp biểu diễn và tính toán dây chuyền thi công bằng ma trận cho phép kiểm soát và điều chỉnh quá trình theo thời gian thực, có xét đến các thay đổi phát sinh trong quá trình thi công. Việc sử dụng thuật toán ma trận không chỉ cho phép đánh giá lại các tham số thời gian của từng quá trình riêng lẻ mà còn giúp xác định mức độ ảnh hưởng của các điều chỉnh cục bộ đến tổng thời gian thi công của toàn bộ công trình. Thông qua các điều chỉnh, đặc biệt là rút ngắn thời gian thực hiện của một số công đoạn, các quá trình được đưa về trạng thái hợp lý hơn, đảm bảo tính đồng bộ, liên tục và ổn định của dây chuyền thi công, đồng thời tối ưu hóa tổng thời gian thực hiện dự án.

Cần lưu ý rằng các kết quả trong ví dụ minh họa của bài báo chỉ nhằm mục đích làm rõ thuật toán ma trận được trình bày trong phần tổng quan. Hơn nữa, các kết luận được rút ra dựa trên một số lượng trường hợp nghiên cứu còn hạn chế. Do đó, khả năng áp dụng của phương pháp trong các tình huống khác nhau cần tiếp tục được kiểm chứng trong các nghiên cứu tiếp theo, đây cũng là hướng phát triển của tác giả trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Trần Thị Thanh Thanh, Giáo trình tổ chức thi công, 2024.

[2] Владимиров, И., Применение матричного алгоритма расчета продолжительности строительства монолитных зданий с использованием поточной организации строительного производства. Наука и бизнес: пути развития, (4 (82)): p. 89, 2018.

[3] Nguyễn Văn Cự. Phương pháp thiết lập và tính toán thời gian của sơ đồ mạng được tổ chức thi công dây chuyền, Tạp chí Xây dựng, 2023. Internet: https://tapchixaydung.vn/phuong-phap-thiet-lap-va-tinh-toan-thoi-gian-cua-so-do-mangduoc-to-chuc-thi-cong-day-chuyen-20201224000019414.html (truy cập tháng 02/2026).

[4] Bộ Xây dựng, Giáo trình Tổ chức thi công xây dựng, NXB Xây dựng, Hà Nội, tái bản 2011.

[5] Синенко, С., et al., Разработка проектов организации строительства промышленных зданий и сооружений. 2016.

[6] Barrie, D.S. and B.C. Paulson, Professional construction management: including CM, design construction, and general contracting. (No Title), 1992.

[7] Harris, F., et al., Modern construction management. 2020: John Wiley & Sons.

[8] Олейник, П. and В. Бродский, Организация строительного производства. 2014.

[9] Теличенко, В., Строительство и реконструкция зданий и сооружений городской инфраструктуры. Организация и технология строительства: Научно-справочное пособие. М.: АСВ, 1: p. 520, 2009.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Mô phỏng số dòng xoáy qua cụm trụ cầu đặt nối tiếp tại số Reynolds thấp

Numerical analysis of flow past tandem bridge piers at low Reynolds number

> NGUYỄN MINH PHÚC, NGUYỄN VĂN AN, LƯU ANH VĂN, TS MAI QUANG HUY*
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: mqhuy@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng số dòng chảy bao quanh hệ hai trụ cầu tròn đặt nối tiếp tại số Reynolds thấp (Re=100) bằng phương pháp Thủy động lực học tính toán (CFD). Mô hình nghiên cứu sử dụng phương pháp Thể tích hữu hạn (FVM) để giải hệ phương trình Navier-Stokes trong không gian hai chiều với tỷ số khoảng cách tâm tương đối L/D = 2 ÷ 10. Kết quả nghiên cứu chỉ ra 3 vùng dòng chảy đặc trưng phụ thuộc chặt chẽ vào khoảng cách giữa các trụ: (i) Khi L/D ≤ 3, vùng dòng chảy bám, lúc này trụ hạ lưu nằm hoàn toàn trong vùng xoáy của trụ phía trước; (ii) Khi L/D > 4, vùng xoáy đồng thời, hai trụ hình thành các xoáy độc lập và hoạt động gần như không phụ thuộc lẫn nhau; (iii) Khi 3 < L/D < 4, dòng chảy ở vùng chuyển tiếp, đây là giai đoạn quá độ ghi nhận bước nhảy đột ngột của hệ số lực cản trên trụ hạ lưu.

Từ khóa: CFD; trụ cầu nối tiếp; số Reynolds thấp; chế độ chảy bám; xoáy đồng thời.

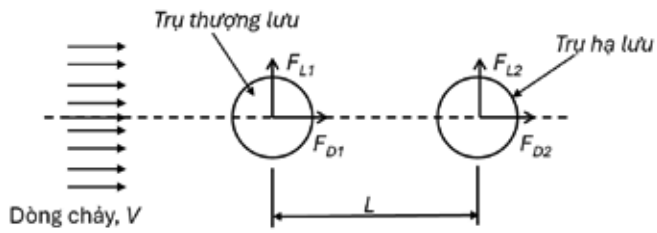
ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of vortex flow past tandem circular bridge piers at a low Reynolds number (Re=100) using Computational Fluid Dynamics (CFD). The simulations were conducted using a 2D unsteady laminar model with center-to-center distance ratios (L/D) ranging from 2 to 10. The results identify three distinct flow regimes characterized by the spacing between the piers: (i) At L/D ≤3, the flow is in the reattachment regime, where the downstream pier is completely submerged within the wake of the upstream pier; (ii) At L/D > 4, the flow transitions to the co-shedding regime, in which both piers form independent Von Kármán vortex streets and act almost independently; (iii) For 3 < L/D < 4, a transition regime occurs, marking a sudden jump in the drag coefficient of the downstream pier.

Keywords: CFD; tandem bridge piers; low Reynolds number; reattachment regime; co-shedding.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các công trình kỹ thuật thủy lực, giao thông và công trình biển, kết cấu dạng trụ tròn được sử dụng rất phổ biến dưới hình thức các móng cọc, trụ cầu, hệ thống đường ống hay chân đế giàn khoan [1, 2]. Trong điều kiện vận hành thực tế, các kết cấu này hiếm khi tồn tại đơn lẻ mà thường được bố trí thành cụm để đáp ứng yêu cầu chịu lực. Khi dòng chảy của nước đi qua một cụm kết cấu, sự hiện diện của trụ phía trước sẽ làm thay đổi hoàn toàn điều kiện biên và cấu trúc dòng chảy hướng vào trụ phía sau, tạo ra hiện tượng giao thoa vùng xoáy đứng. Sự tương tác thủy động lực học này làm biến đổi sâu sắc sự phân bố trường vận tốc, cấu trúc xoáy, lực cản (F_D) và lực nâng (F_L) tác dụng lên từng trụ so với khi chúng đứng độc lập [3]. Việc hiểu rõ bản chất của hiện tượng này có ý nghĩa sống còn trong thiết kế, bởi sự thay đổi đột ngột của lực thủy động có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định, khả năng chịu tải và đặc biệt là hiện tượng xói lở cục bộ tại móng công trình.



Hình 1. Hai trụ tròn đặt nối tiếp (tandem) trong dòng chảy

Đối với cấu hình hệ hai trụ tròn đặt nối tiếp như Hình 1, nền tảng lý thuyết về tương tác dòng chảy đã được định hình rõ nét qua công trình nghiên cứu của Zdravkovich [4]. Tác giả chỉ ra rằng, hình thái vùng thức của hệ bị chi phối bởi khoảng cách tâm tương đối *L/D* (với *L* là khoảng cách tâm hai trụ và *D* là đường kính trụ). Ở khoảng cách hẹp, lớp biên từ trụ trước bám trực tiếp lên trụ sau, hình thành chế độ dòng chảy bám lại. Hiệu ứng che khuất lúc này

làm giảm mạnh lực cản lên trụ sau, thậm chí sinh ra lực đẩy âm. Ngược lại, khi *L/D* vượt qua ngưỡng tới hạn, dòng chảy xâm nhập vào khe hở, phá vỡ lớp bao phủ và hình thành chế độ tách xoáy đồng thời. Sự chuyển pha này luôn đi kèm "bước nhảy vọt" của hệ số lực cản, tiềm ẩn rủi ro xói lở nền móng nghiêm trọng do dao động thứ cấp [4].

Để giải quyết bài toán này, phương pháp Thể tích hữu hạn (FVM) trong mô phỏng CFD là một công cụ đắc lực, như Amer và cộng sự đã chứng minh khi dự báo chính xác các hệ số lực và cấu trúc xoáy [5]. Tại Việt Nam, nghiên cứu tương tác dòng chảy bằng mô phỏng số cũng đang phát triển. Tiêu biểu, Vũ Huy Công (2017) đã phân tích chi tiết đặc tính ranh giới vùng xoáy phía sau kết cấu trụ đơn [6]. Bên cạnh đó, các cơ sở về lựa chọn mô hình toán học và rời rạc hóa không gian cũng được làm rõ qua công bố của Vũ Huy Công và cộng sự (2015), tạo tiền đề mở rộng sang các hệ kết cấu phức tạp hơn [7].

Mặc dù bài toán dòng chảy bao quanh trụ đơn lẻ đã được nghiên cứu kỹ lưỡng, việc định lượng hóa các chế độ tương tác của hệ trụ nối tiếp ở các dải Reynolds khác nhau vẫn đang là thách thức đối với các kỹ sư. Trong dải số Reynolds thấp (*Re*=100), dòng chảy duy trì trạng thái tầng ổn định, cho phép quan sát rõ nét các cơ chế tương tác cốt lõi như vùng chảy bám (reattachment) và tách xoáy đồng thời (co-shedding). Bài báo này ứng dụng phương pháp thủy động lực học tính toán (CFD) để mô phỏng và phân tích chi tiết dòng xoáy qua cụm hai trụ cầu đặt nối tiếp với khoảng cách tâm tương đối *L/D* thay đổi từ 2 đến 10. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xác lập mối liên hệ giữa khoảng cách tương đối và hệ số lực cản, đồng thời làm sáng tỏ cơ chế vật lý dẫn đến "bước nhảy lực cản" trong giai đoạn quá độ. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở dữ liệu khoa học tin cậy để tối ưu hóa bố trí cụm trụ cầu và định lượng chính xác sự biến đổi của hệ số lực cản. Việc trực quan hóa cấu trúc xoáy giúp giải mã cơ chế che khuất, từ đó đóng góp dữ liệu quan trọng cho việc tính toán tải trọng và dự báo xói lở móng cầu trên sông ngòi Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương trình chủ đạo và phương pháp FVM

Quá trình mô phỏng số trong nghiên cứu này dựa trên việc giải hệ phương trình Navier-Stokes tổng quát cho dòng chảy không ổn định và chất lỏng không nén được. Hệ phương trình được trình bày dưới dạng bảo toàn như sau [8]:

** Phương trình bảo toàn khối lượng:*

(1)

** Phương trình bảo toàn động lượng:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

Trong đó: p là khối lượng riêng; là vector vận tốc; *t* là thời gian; $\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u})$ tensor ứng suất nhớt; và lần lượt là lực tr[illegible]ại lực tác động.

Phần mềm Ansys Fluent sử dụng $\vec{u}$ hương pháp Thể tích hữu hạn (Finite Volume Method - FVM) để giải hệ p$\rho\vec{g}$ông $\vec{F}$ trình trên. Trong FVM, miền tính toán được chia thành các thể tích kiểm soát rời rạc. Các phương trình vi phân được tích phân trên từng thể tích kiểm soát, sau đó sử dụng định lý Gauss để chuyển đổi các tích phân thể tích thành tích phân bề mặt [9]. Quá trình này giúp chuyển hệ phương trình vi phân thành hệ phương trình đại số tuyến tính, đảm bảo tính bảo toàn của các đại lượng vật lý ngay cả trên lưới thô.

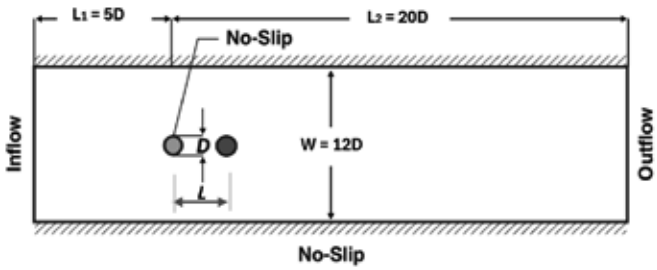
Về mô hình dòng chảy, nghiên cứu sử dụng phương pháp giải trực tiếp hệ phương trình Navier-Stokes lưỡng tính trong không gian hai chiều (2D Unsteady Laminar). Phương pháp này hoàn toàn phù hợp để nắm bắt chính xác cơ chế tách xoáy Von Kármán và sự biến thiên lực cản tại *Re* = 100. Quá trình giải số sử dụng thuật toán SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) để liên kết áp suất và vận tốc. Các thành phần động lượng được rời rạc hóa không gian bằng sơ đồ Second Order Upwind. Quá trình tiến triển theo thời gian sử dụng sơ đồ ẩn bậc hai (Second Order Implicit) với bước thời gian đủ nhỏ nhằm đảm bảo chỉ số Courant (CFL) nằm trong giới hạn an toàn. Sự hội tụ được kiểm soát chặt chẽ với sai số dư (residual) của các đại lượng vận tốc và áp suất xuống dưới ngưỡng 10^{-5}.

2.2. Thiết lập mô hình và miền tính toán

Nghiên cứu khảo sát dòng chảy bao quanh cụm hai trụ tròn có cùng đường kính *D* = 1 m, đặt nối tiếp (tandem) với các tỷ số khoảng cách tâm tương đối *L/D* = 2÷10.

Miền tính toán được thiết kế đủ rộng để loại bỏ ảnh hưởng của các biên lên cấu trúc dòng chảy quanh trụ. Kích thước miền tính toán bao gồm: Khoảng cách từ tâm trụ trước đến biên đầu vào $L_1 = 5D$; khoảng cách từ tâm trụ trước đến biên đầu ra $L_2 = 20D$ và bề rộng miền $W = 12D$. Sơ đồ chi tiết miền tính toán được thể hiện trong Hình 2. Các điều kiện biên được thiết lập cụ thể như sau:

Biên đầu vào (Inflow): Điều kiện vận tốc đồng đều (Velocity-inlet) được xác định để số Reynolds ($Re = \frac{\rho V D}{\mu}$ = 100). Môi chất sử dụng là nước. Biên đầu ra (Outflow): Điều kiện áp suất tĩnh (Pressure-outlet). Bề mặt trụ: Điều kiện thành cứng không trượt (No-slip wall). Biên hai bên: Điều kiện đối xứng (Symmetry) được áp dụng nhằm triệt tiêu sự hình thành lớp biên tại thành vách, giúp giảm thiểu nhiễu của hiệu ứng độ chắn (blockage effect) lên kết quả mô phỏng.



Hình 2. Sơ đồ miền tính toán và các điều kiện biên của hệ trụ nối tiếp (tandem)

Dựa trên giá trị của số Re, vận tốc đầu vào V được xác định tương ứng cho từng trường hợp khảo sát. Các thông số này được thiết lập tại biên vào Velocity-inlet để đảm bảo số *Re* = 100. Chi tiết giá trị vận tốc và các thông số mô hình tính toán được tổng hợp trong Bảng 1.

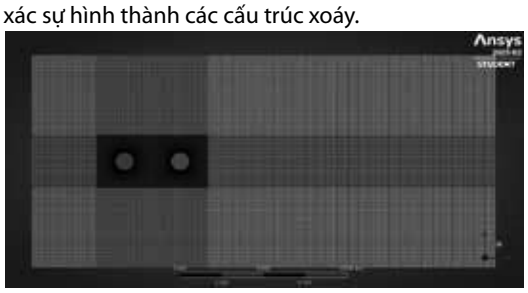
Bảng 1. Một số thông số của mô hình tính toán

STT	Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Vận tốc dòng chảy tới	V	0,0001	m/s
2	Khối lượng riêng của nước*	p	998,2	kg/m³
3	Hệ số nhớt động lực của nước*	μ	0,001003	Pa.s.
4	Đường kính trụ	D	1,0	m
5	Số Reynolds	Re	100	-
6	Khoảng cách tâm tương đối	L/D	2÷10	-

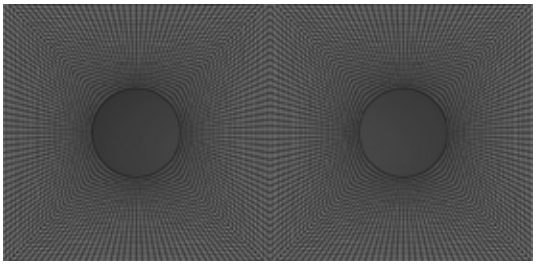
Ghi chú: *Các thuộc tính vật lý của nước tại 20°C trong thư viện Ansys Fluent.

2.3. Lưới tính toán

Lưới tính toán được cấu trúc theo dạng hỗn hợp (hybrid mesh) nhằm tối ưu hóa độ chính xác và hiệu quả thời gian chạy mô phỏng, như minh họa trong Hình 3. Toàn bộ miền tính toán được chia thành khoảng 27.400 phần tử khi *L/D* ≤3 đến 37.400 phần tử khi *L/D*≥ 4. Kích thước phần tử được kiểm soát chặt chẽ: Đạt giá trị nhỏ nhất khoảng 0,0196 m tại khu vực sát bề mặt các hình trụ và tăng dần đến tối đa khoảng 0,155 m ở các biên xa. Tại bề mặt trụ, hệ thống lưới biên (inflation layers) gồm các lớp phần tử tứ giác mịn được thiết lập để giải quyết triệt để sự biến thiên vận tốc trong lớp biên. Vùng khe hở và vùng xoáy phía sau được làm mịn cục bộ để bắt chính xác sự hình thành các cấu trúc xoáy.



a)



b)

Hình 3. Cấu trúc lưới tính toán: a) - Lưới toàn miền; b) - Chi tiết lưới và lớp biên tại bề mặt trụ

2.4. Các thông số đặc trưng

Để đánh giá tác động của dòng chảy lên hệ trụ, hệ số lực cản không thứ nguyên (C_d) được trích xuất từ kết quả mô phỏng. Công thức xác định như sau [8]:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V^2 D} \quad (3)$$

Trong đó: F_d là tổng lực tác dụng lên bề mặt trụ theo phương song song với dòng chảy; các tham số khác đã giải thích ở trên.

Các giá trị C_d được khảo sát cho một trụ đơn, trụ trước C_{d1} và trụ sau

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kiểm định mô hình và phân tích độ nhạy của lưới

Nghiên cứu thực hiện kiểm chứng mô hình trên trường hợp trụ tròn đơn. Tiến hành phân tích độ nhạy của lưới với 3 kích cỡ lưới: 30 mm, 19,6 mm, 9,8 mm. Kết quả cho thấy, khi kích thước phần tử giảm xuống dưới 19,6 mm, các thông số thủy động lực học bắt đầu hội tụ và sự thay đổi về hệ số lực cản ít. Do đó, nghiên cứu lựa chọn kích thước lưới 19,6 mm.

Hệ số lực cản thường được chọn làm tiêu chuẩn để kiểm chứng độ chính xác của các mô hình số dòng chảy bao quanh hình trụ. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng thông số trên để kiểm định mô hình thông qua việc so sánh với các dữ liệu chuẩn đã công bố như trong Bảng 2.

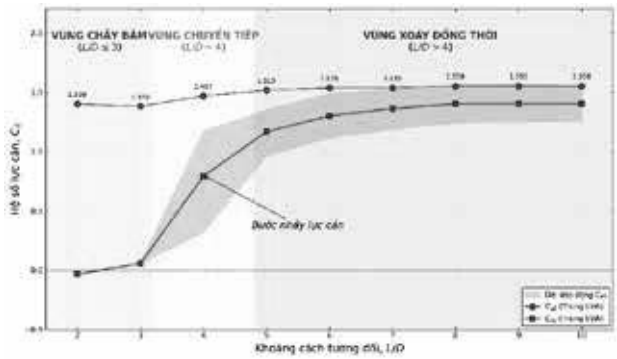
Bảng 2. So sánh hệ số lực cản (C_d) của trụ đơn lẻ tại số Re = 100.

Nguồn tài liệu	Phương pháp	Hệ số cản Cd
Tritton (1959) [10]	Đường cong thực nghiệm	1,31
Lam và cộng sự (2008) [11]	Mô phỏng số	1,36
Meneghini và cộng sự (2001) [12]	Mô phỏng số	1,37
Nghiên cứu này	Mô phỏng số	1,50

Dù tồn tại những sai lệch định lượng nhỏ do đặc thù của điều kiện biên và giới hạn của mô hình 2D, các đặc trưng hình thái dòng chảy vẫn thể hiện sự tương đồng chặt chẽ với các quy luật lý thuyết. Sự nhất quán này khẳng định độ tin cậy của mô hình số, tạo tiền đề vững chắc cho các phân tích chuyên sâu về tương tác vùng thức và hiện tượng bước nhảy lực cản trên hệ trụ nối tiếp trong các phần tiếp theo.

3.2. Ảnh hưởng của tỷ số khoảng cách đến hệ số lực cản

Đặc tính thủy động lực học của hệ hai trụ nối tiếp tại *Re* = 100 thể hiện sự nhạy cảm rõ rệt với tỷ số khoảng cách *L/D*, được minh họa chi tiết qua diễn biến của các hệ số lực cản trong Hình 4.



Hình 4. Sự biến thiên của hệ số lực cản (C_d) theo khoảng cách tương đối (L/D) tại Re = 100

- Hệ số cản của trụ trước(C_{d1}): Kết quả chỉ ra một quy luật phi tuyến tính đáng chú ý. Giá trị C_{d1} không tăng ngay từ đầu mà giảm nhẹ từ 1,399 (tại *L/D* = 2) xuống mức cực tiểu 1,379 (tại *L/D* = 3). Hiện tượng này cho thấy ở khoảng cách hẹp, trụ sau đóng vai trò như một bộ phận kéo dài vùng xoáy của trụ ở thượng lưu, làm giảm lực cản tác động lên trụ thượng lưu. Khi khoảng cách tiếp tục tăng (*L/D* ≥ 4), C_{d1} phục hồi nhanh chóng và đạt trạng thái ổn định ở mức 1,55 từ mốc *L/D* = 8, tiệm cận giá trị của một trụ đơn độc lập.

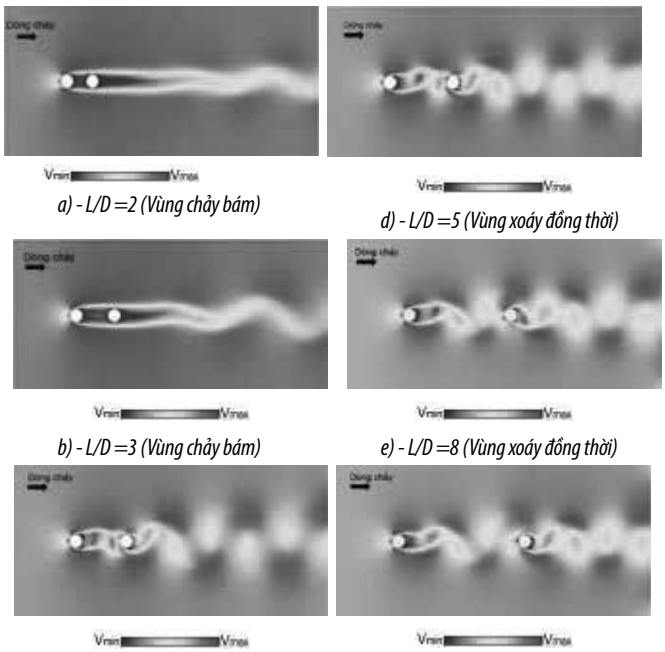
- Hệ số cản của trụ sau (C_{d2}): Trụ hạ lưu chịu ảnh hưởng phức tạp hơn bởi hiệu ứng che khuất. Tại *L/D* = 2, hệ số lực cản trung bình nhận giá trị âm (C_{d2} = - 0,034) với biên độ dao động bằng 0, minh chứng cho sự tồn tại của lực đẩy ngược ổn định hướng về phía thượng lưu. Đặc biệt, kết quả chỉ ra một "bước nhảy lực cản" đột ngột khi khoảng cách chuyển từ *L/D* = 3 sang *L/D* = 4, khiến giá trị trung bình C_{d2} vọt từ 0,055 lên 0,790.

- Đặc tính dao động của hệ số C_{d2}: Điểm đáng chú ý nhất trên đồ thị là sự thay đổi biên độ dao động tại mốc quá độ *L/D* = 4. Tại đây, dải giá trị lực cản trải rộng từ cực tiểu 0,319 đến cực đại 1,168, đánh dấu sự mất ổn định cực độ của cấu trúc dòng chảy trước khi thiết lập chế độ tách xoáy đồng thời. Ở các khoảng cách lớn (*L/D* ≥ 8), mặc dù dao động vẫn duy trì nhưng giá trị trung bình ổn định quanh mức 1,40 thấp hơn khoảng 10% so với trụ trước do vẫn chịu ảnh hưởng của vùng xoáy phía sau trụ thượng lưu.

3.3. Cấu trúc dòng chảy và cơ chế tương tác vùng xoáy giữa hai trụ

Dựa trên bản đồ độ xoáy trích xuất từ mô phỏng, cơ chế tương tác giữa hai trụ được phân loại thành hai chế độ chính, giải thích trực tiếp cho các biến động về hệ số lực cản đã phân tích.

Tại các khoảng cách hẹp ($L/D \leq 3$), lớp biên tách ra từ trụ trước không đủ không gian để cuộn thành xoáy hoàn chỉnh. Thay vào đó, dòng chảy bao phủ toàn bộ khe hở và bám trực tiếp vào bề mặt trụ sau. Vùng khe hở lúc này trở thành một vùng "nước tù" với vận tốc luân chuyển thấp và áp suất âm lớn (Hình 5a, 5b). Trạng thái này tạo ra hiệu ứng che khuất (sheltering effect) cực mạnh, giải thích cho sự xuất hiện của lực đẩy âm trên trụ sau, kéo kết cấu hạ lưu về phía thượng lưu.



a) - L/D =2 (Vùng chảy bám)

b) - L/D =3 (Vùng chảy bám)

c) - L/D =4 (Vùng chuyển tiếp)

d) - L/D =5 (Vùng xoáy đồng thời)

e) - L/D =8 (Vùng xoáy đồng thời)

f) - L/D =10 (Vùng xoáy đồng thời)

Hình 5. Bản đồ độ xoáy khi số Re = 100

Khi khoảng cách vượt qua ngưỡng tới hạn ($L/D > 4$) dòng chảy đủ động năng để xuyên thấu vào khe hở, phá vỡ lớp bao phủ. Trụ trước lúc này bắt đầu hình thành các xoáy Von Kármán độc lập và đập trực tiếp vào mặt trước trụ sau (Hình 5d, e, f). Sự thay đổi đột ngột từ trạng thái bao phủ sang trạng thái tách xoáy độc lập này chính là nguyên nhân vật lý gây ra "bước nhảy" hệ số lực cản. Việc mất đi vùng áp suất ổn định trong khe hở khiến áp suất vùng đáy trụ trước giảm mạnh, làm phục hồi giá trị C_{d1} về mức tương đương trụ đơn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày chi tiết các đặc tính động lực học của dòng chảy bao quanh hệ hai trụ cầu tròn đặt nối tiếp tại số Reynolds thấp $Re = 100$. Kết quả mô phỏng thể hiện sự thống nhất cao với dữ liệu thực nghiệm kinh điển của Tritton, khẳng định độ tin cậy của phương pháp mô phỏng số được thiết lập. Các thông số đặc trưng, đặc biệt là hệ số lực cản trên trụ trước (C_{d1}) và trụ sau (C_{d2}), cho thấy sự phụ thuộc mật thiết vào khoảng cách tương đối L/D. Ở khoảng cách hẹp, hiện tượng bám lại của dòng chảy tạo ra hiệu ứng che khuất mạnh mẽ, dẫn đến sự xuất hiện của lực đẩy âm lên trụ hạ lưu. Đồng thời, nghiên cứu cũng xác định rõ ngưỡng khoảng cách tới hạn sinh ra bước nhảy lực cản, phản ánh sự thay đổi của chế độ dòng chảy từ chảy bám lại sang tách xoáy đồng thời. Kết quả này giúp hiểu rõ hơn về cơ chế tương tác vùng xoáy cũng như sự biến động tải trọng thủy động lên cụm trụ cầu - một kết cấu hạ tầng giao thông phổ biến. Nghiên cứu này đồng thời chứng minh sự thành công của việc ứng dụng mô hình số CFD trong việc dự báo các hiện tượng thủy lực phức tạp, cung cấp một công cụ hỗ trợ thiết kế hiệu quả, giúp tiết kiệm chi phí và thời gian so với các thử nghiệm mô hình vật lý truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Md. M. Alam, M. Moriya, K. Takai and H. Sakamoto. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 91, no. 1, pp. 139-154, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0167-6105(02)00341-0.

[2] H. Zhu, B. Xu, M. M. Alam, Y. Gao and T. Zhou.Vortex-induced vibration and hydrodynamic characteristics of a round-ended cylinder. Ocean Eng., vol. 284, p. 115284, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115284.

[3] M. M. Alam, M. Elhimer, L. Wang, D. L. Jacono and C. W. Wong. Vortex shedding from tandem cylinders. Exp. Fluids, vol. 59, no. 3, p. 60, Feb. 2018, doi: 10.1007/s00348-018-2501-8.

[4] M. M. Zdravkovich. The effects of interference between circular cylinders in cross flow†. J. Fluids Struct., vol. 1, no. 2, pp. 239-261, Apr. 1987, doi: 10.1016/S0889-9746(87)90355-0.

[5] M. Amer, A. Abuelyamen, V. Parezanovic, A. Alkaabi, S. Alameri and I. Afgan. A comprehensive review, CFD and ML analysis of flow around tandem circular cylinders at sub-critical Reynolds numbers. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, vol. 257, p. 105998, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jweia.2024.105998.

[6] Vũ Huy Công. Nghiên cứu cấu trúc dòng chảy xung quanh hình trụ tròn sử dụng 'Lagrangian coherent structure, vol. 57, 2017. Internet: https://vjol.info.vn/DHTL/article/view/30956/26257 (accessed: Apr. 17, 2026).

[7] H. C. Vu, J. Ahn, and J. H. Hwang. Numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangement at low Reynolds numbers. KSCE J. Civ. Eng., vol. 20, no. 4, pp. 1594-1604, May 2016, doi: 10.1007/s12205-015-0602-y.

[8] P. K. Kundu. FLuid mechanics. Academic Press, 1990.

[9] An Introduction to Ansys Fluent 2025, SDC Publications.

[10] D. J. Tritton. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics, Camb. Core, doi: 10.1017/S0022112059000829.

[11] K. Lam, W. Gong, and R. M. C. So. Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration. J. Fluids Struct., vol. 24, pp. 34-57, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2007.06.003.

[12] J. R. Meneghini, F. Saltara, C. L. R. Siqueira and J. A. Ferrari. Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. J. Fluids Struct., vol. 15, no. 2, pp. 327-350, Feb. 2001, doi: 10.1006/jfls.2000.0343.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 03/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Phát triển ứng dụng và đánh giá hiệu quả công cụ tra cứu trực tuyến hỗ trợ kiểm soát hoạt động luân chuyển hàng nguy hiểm qua cảng biển Việt Nam

Development and performance evaluation of an online search tool for controlling the movement of dangerous goods through Vietnamese seaports

> THS NGUYỄN THANH DIỆU*, PGS.TS PHAN VĂN HƯNG, TS MAI XUÂN HƯƠNG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenthanhdieu@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả hiện thực hóa hệ thống tra cứu thông minh (NetX) về hàng nguy hiểm dựa trên các nghiên cứu về kỹ thuật tri thức RAG (Retrieval-Augmented Generation) và mô hình RAFT (Retrieval-Augmented Fine-Tuning) đã thiết lập ở trong chương trình nghiên cứu của nhóm tác giả. Nghiên cứu tập trung vào việc chuyển hóa các thuật toán AI thành một sản phẩm công nghệ hoàn chỉnh dưới dạng nền tảng trực tuyến tại địa chỉ netx.com.vn. Nội dung bài báo nhằm giới thiệu chi tiết cấu trúc giao diện, các module chức năng cốt lõi và kết quả đánh giá thực nghiệm. Dữ liệu thực tế cho thấy hệ thống giúp rút ngắn thời gian tra cứu từ vài phút theo phương pháp thủ công xuống dưới 10 giây với độ chính xác trên 95%, cung cấp giải pháp chuyển đổi số hiệu quả cho công tác quản trị an toàn hàng nguy hiểm tại các cảng biển Việt Nam.

Từ khóa: IMDG Code 2024; NetX; RAG; RAFT; hàng nguy hiểm; cảng biển.

ABSTRACT

This paper presents the results of realizing the NetX intelligent dangerous goods search system, developed based on the Retrieval-Augmented Generation (RAG) technique and the Retrieval-Augmented Fine-Tuning (RAFT) model established in the authors' research program. The study focuses on transforming AI algorithms into a complete technological product as an online platform available at netx.com.vn. The content of this article aims to introduce in detail the interface structure, core functional modules and experimental evaluation results. Empirical data shows that the system significantly reduces search time from several minutes using manual methods to under 10 seconds, with an accuracy rate of over 95%. This provides an effective digital transformation solution for safety management of dangerous goods movement at Vietnamese seaports.

Keywords: IMDG Code 2024; NetX; RAG; RAFT; gangerous goods; seaports.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự gia tăng mạnh mẽ của hoạt động thương mại toàn cầu đã thúc đẩy lưu lượng hàng nguy hiểm luân chuyển qua các cảng biển Việt Nam đạt đến những cột mốc mới về khối lượng và tính chất phức tạp. Hàng nguy hiểm (bao gồm các loại hóa chất công nghiệp, năng lượng và đặc biệt là các thiết bị lưu trữ năng lượng mới) đòi hỏi một quy trình kiểm soát nghiêm ngặt nhằm đảm bảo an toàn cho con người, phương tiện và môi trường sinh thái biển. Trong bối cảnh đó, việc tuân thủ Bộ luật Hàng nguy hiểm Hàng hải Quốc tế (IMDG Code) không còn là một lựa chọn mà là yêu cầu bắt buộc đối với mọi chủ thể tham gia vào chuỗi cung ứng hàng hải.

Phiên bản IMDG Code 2024 (Amendment 42-24) đánh dấu một bước ngoặt quan trọng với việc thắt chặt các quy định đối với pin công nghệ mới và các vật liệu có khả năng tự phát nhiệt. Bản cập nhật này (có hiệu lực tự nguyện từ ngày 01/01/2025 và bắt buộc từ ngày 01/01/2026) đưa ra những yêu cầu khắt khe hơn về phân loại, đóng gói và ghi nhãn hàng nguy hiểm. Những thay đổi này tạo ra áp lực vô cùng lớn đối với đội ngũ sĩ quan an toàn, nhân viên khai thác cảng và thuyền viên, những người trực tiếp chịu trách nhiệm phân loại, dán nhãn và sắp xếp hàng hóa tại hiện trường cảng biển.

Thực trạng tại nhiều cảng biển Việt Nam hiện nay cho thấy quy trình tra cứu hàng nguy hiểm vẫn còn phụ thuộc nhiều vào tài liệu giấy hoặc các tệp tin điện tử rời rạc, dẫn đến thời gian truy xuất thông tin kéo dài và rủi ro sai sót cao trong các tình huống khẩn cấp. Dữ liệu thanh tra từ Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) chỉ ra rằng, có tới 34% các lô hàng nguy hiểm tồn tại sai sót về mặt tuân thủ do quy trình tra cứu thủ công lạc hậu [3]. Bên cạnh đó, việc tiếp cận các công cụ tra cứu quốc tế chuyên nghiệp như Hazcheck Online gặp rào cản lớn về chi phí bản quyền, thường dao động từ 182 đến 565 USD cho mỗi người dùng hàng năm. Điều này gây khó khăn cho việc triển khai đại trà tại các đơn vị vận tải và bến cảng có quy mô nhân sự lớn tại Việt Nam. Từ thực tế đó, sự ra đời của hệ thống tra cứu trực tuyến NetX (netx.com.vn) không chỉ là một lời giải cho bài toán chi phí mà còn là bước đi chiến lược trong việc làm chủ công nghệ, nội địa hóa các quy chuẩn an toàn hàng hải quốc tế phù hợp với đặc thù vận hành tại địa phương.

2. MỤC ĐÍCH VÀ YÊU CẦU THIẾT KẾ CỦA HỆ THỐNG TRA CỨU TRỰC TUYẾN NETX

Hệ thống tra cứu NetX được định vị là một nền tảng quản trị tri thức hàng hải trực tuyến, tập trung vào việc hỗ trợ ra quyết định nhanh chóng và chuẩn xác trong kiểm soát hàng nguy hiểm luân chuyển qua cảng biển.

2.1. Mục tiêu chiến lược của giải pháp

Mục tiêu cốt lõi của hệ thống là tối ưu hóa thời gian tra cứu và đảm bảo an toàn tuyệt đối cho hoạt động vận tải biển. NetX hướng tới việc trở thành một "trợ lý số" tin cậy cho thuyền viên, nhân viên cảng và các cá nhân cần tiếp cận kiến thức an toàn một cách linh hoạt. Hệ thống không chỉ cung cấp thông tin thô mà còn diễn giải các quy định phức tạp của IMDG Code 2024 thành các chỉ dẫn dễ hiểu, giúp người dùng nhận diện nhanh chóng các nguy cơ cháy nổ, tính chất hóa học và các yêu cầu đóng gói bắt buộc. Ngoài ra, việc xây dựng một công cụ nội địa giúp các doanh nghiệp Việt Nam làm chủ công nghệ, giảm sự phụ thuộc vào các dịch vụ đắt đỏ từ nước ngoài và tạo cơ hội mở rộng các mô hình phần mềm dịch vụ (SaaS) trong tương lai.

2.2. Yêu cầu kỹ thuật và trải nghiệm người dùng

Về mặt thiết kế, NetX đặt ưu tiên hàng đầu vào tính trực quan và khả năng tiếp cận. Giao diện và trải nghiệm người dùng (UI/UX: *User Interface/User Experience*) được xây dựng để phù hợp với cả những người dùng phi chuyên gia, đảm bảo mọi thao tác từ tìm kiếm đến hỏi đáp đều diễn ra mượt mà. Các yêu cầu kỹ thuật cụ thể bao gồm:

2.2.1. Tính khả dụng và hiệu suất

Hệ thống phải hoạt động ổn định trên nền tảng trực tuyến, hỗ trợ truy cập đa thiết bị và đảm bảo tốc độ truy vấn kết quả gần như tức thời.

2.2.2. Độ chính xác và cập nhật

Dữ liệu về hướng dẫn đóng gói (Packing Instructions), điểm bắt cháy (Flash Point), tính chất hàng hóa và nhóm đóng gói (Packing Group) phải được cập nhật chính xác theo phiên bản IMDG Code 2024 mới nhất.

2.2.3. Bảo mật và phân quyền

Áp dụng các tiêu chuẩn bảo mật hiện đại như JWT Authentication và Google OAuth 2.0 để bảo vệ thông tin người dùng và phân cấp quyền hạn rõ ràng giữa các nhóm Quản trị viên, Nhân viên và Khách hàng.

Bảng 1. Các tiêu chí thiết kế và nền tảng công nghệ của hệ thống NetX

Tiêu chí thiết kế	Yêu cầu chi tiết	Lợi ích vận hành
Công nghệ Frontend	React, Tailwind CSS	Giao diện hiện đại, phản hồi nhanh, tương thích di động
Công nghệ Backend	Python, Django	Xử lý logic nghiệp vụ phức tạp và dữ liệu AI mạnh mẽ
Cơ sở dữ liệu	MySQL, FAISS (Vector Store)	Lưu trữ dữ liệu quan hệ và tìm kiếm ngữ nghĩa hiệu quả
Xác thực	JWT, Google OAuth 2.0	Đảm bảo tính riêng tư và bảo mật dữ liệu khách hàng
Kiến trúc	Microservices/ Modular	Dễ dàng mở rộng tính năng và bảo trì định kỳ

3. PHÁT TRIỂN ỨNG DỤNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CÔNG CỤ TRA CỨU TRỰC TUYẾN HỖ TRỢ KIỂM SOÁT HOẠT ĐỘNG LUÂN CHUYỂN HÀNG NGUY HIỂM QUA CẢNG BIỂN VIỆT NAM THEO TIÊU CHUẨN IMDG CODE 2024

3.1. Các mô-đun chức năng chính của hệ thống tra cứu NetX

NetX được cấu trúc thành các mô-đun chức năng logic, hỗ trợ toàn diện quy trình nghiệp vụ từ quản trị đến tác nghiệp trực tiếp tại hiện trường.

3.1.1. Mô-đun tra cứu nhanh mã số UN (United Nations) và tên hóa chất

Đây là trái tim của hệ thống, cho phép người dùng nhập mã số Liên hợp quốc (UN Number) gồm 4 chữ số hoặc tên hàng hóa (Proper Shipping Name) để truy xuất dữ liệu. Khi người dùng thực hiện tìm kiếm, hệ thống không chỉ hiển thị các thông tin cơ bản mà còn liệt kê lịch sử tra cứu gần nhất, giúp tiết kiệm thời gian cho những loại hàng hóa thường xuyên xuất hiện tại cảng. Kết quả tìm kiếm nhanh bao gồm thông tin về Class (*Nhóm hàng nguy hiểm*), Division (*Phân nhóm*) và Packing Group (*Nhóm đóng gói*), giúp nhân viên cảng nhận diện tức thời mức độ rủi ro của kiện hàng.

3.1.2. Mô-đun thông tin đóng gói và chi tiết hàng hóa

Sau khi chọn một mặt hàng cụ thể, hệ thống sẽ mở ra một trang chi tiết cung cấp cái nhìn toàn diện về các yêu cầu kỹ thuật.

- Hướng dẫn đóng gói (Packing Information): Cung cấp chi tiết các mã hướng dẫn đóng gói (ví dụ: P001, P002) và các quy định đặc biệt về bao bì trung gian (IBC) hoặc bồn chứa di động.

- Thông tin phân loại (Classification): Hiển thị rõ ràng các nguy cơ chính và nguy cơ phụ kèm theo, giúp xác định chiến lược ứng phó sự cố.

- Thông tin bổ sung (Additional Information): Bao gồm điểm bắt cháy (Flash Point) và các đặc tính lý hóa quan trọng khác phục vụ bảo quản.

- Nhãn mác và biển cảnh báo (Labels, Marks & Placards): Cung cấp hình ảnh mẫu của các loại nhãn và ký hiệu cần thiết, giúp nhân viên hiện trường đối chiếu độ chuẩn xác của việc dán nhãn trên container.

3.1.3. Mô-đun phân tách và xếp dỡ theo IMDG Code

Mô-đun này giải quyết khía cạnh phức tạp nhất trong quản trị hàng nguy hiểm: Tính tương tác giữa các loại hóa chất khác nhau. Hệ thống tự động áp dụng các quy tắc phân tách (Segregation) dựa trên ma trận của IMDG Code 2024, đưa ra các cảnh báo như

"Cách xa" (Away from) hoặc "Cách biệt" (Separated from). Ngoài ra, mô-đun cũng cung cấp các yêu cầu xếp dỡ chung (General Stowage Requirements) để sĩ quan kế hoạch có thể bố trí vị trí hàng hóa trên tàu hoặc tại bãi cảng một cách an toàn nhất, tránh xa các nguồn nhiệt hoặc các khu vực nhạy cảm.

3.2. Trợ lý ảo Chatbot thông minh (AI Assistant)

Khác với các công cụ tra cứu dữ liệu tĩnh, Chatbot của NetX mang lại khả năng tương tác tự nhiên và cá nhân hóa. Người dùng có thể đặt các câu hỏi nghiệp vụ bằng ngôn ngữ tự nhiên như: "*Nhóm đóng gói của UN 1203 là gì?*" hoặc "*Quy định mới về pin Natri-ion trong IMDG 2024 là gì?*". Chatbot sử dụng tri thức được huấn luyện để trả lời ngay lập tức, kèm theo các trích dẫn nguồn hoặc đề xuất tài liệu tham khảo. Điều này đặc biệt hữu ích cho những nhân viên mới hoặc trong các tình huống cần giải đáp nhanh mà không có sự hiện diện của chuyên gia an toàn.

3.3. Hệ thống quản trị và thống kê (Admin Dashboard)

Mô-đun này dành riêng cho quản trị viên và nhân viên hệ thống để duy trì sự vận hành thông suốt.

3.3.1. Quản lý dữ liệu

Cho phép thêm, sửa, xóa thông tin hàng hóa và cập nhật các tài liệu hướng dẫn PDF mới nhất. Mỗi thao tác thay đổi đều được lưu lại lịch sử truy vết để đảm bảo tính minh bạch.

3.3.2. Quản lý người dùng và tổ chức

Phân cấp quản lý các doanh nghiệp, tổ chức và vị trí công việc của từng thành viên, hỗ trợ quy trình đăng ký và xác thực tài khoản.

3.3.3. Phân tích và thống kê

Cung cấp các biểu đồ trực quan về lượt tìm kiếm hàng hóa và hoạt động hỏi đáp của Chatbot. Những dữ liệu này giúp nhà quản lý cảng nhận diện được các loại hàng nguy hiểm phổ biến và các vấn đề mà nhân viên thường xuyên gặp phải, từ đó có kế hoạch đào tạo phù hợp.

3.4. Mô tả giao diện người dùng và trải nghiệm trên NetX

Giao diện của NetX được thiết kế theo phong cách hiện đại, tập trung vào sự tối giản và tối ưu hóa luồng công việc của người dùng.

3.4.1. Giao diện trang chủ và đăng nhập

Khi truy cập https://netx.com.vn, người dùng sẽ bắt gặp một trang chủ chuyên nghiệp với các thông tin giới thiệu tổng quan về giải pháp. Giao diện đăng nhập được thiết kế rõ ràng, cho phép người dùng truy cập bằng tài khoản đã được cấp. Hệ thống cũng tích hợp chức năng lấy lại mật khẩu tự động qua email, giúp giảm bớt gánh nặng hỗ trợ kỹ thuật cho quản trị viên.

Hình 1. Giao diện trang chủ Hệ thống tra cứu trực tuyến hàng nguy hiểm (NetX)

3.4.2. Giao diện tìm kiếm và chi tiết hàng hóa

Trang tìm kiếm được thiết kế với thanh nhập liệu lớn ở vị trí trung tâm, hỗ trợ tìm kiếm nhanh theo mã UN. Kết quả tìm kiếm được hiển thị dưới dạng danh sách dễ nhìn, kèm theo các biểu tượng Class đặc trưng. Khi nhấn vào một mặt hàng, giao diện chi tiết sẽ hiện ra với các tab thông tin được phân loại logic, giúp người dùng không bị choáng ngợp bởi quá nhiều dữ liệu. Hình ảnh các nhãn mác nguy hiểm được hiển thị với độ phân giải cao, hỗ trợ tốt cho việc đối chiếu thực địa.

Hình 2. Giao diện tìm kiếm hàng hóa

3.4.3. Giao diện tương tác Chatbot

Cửa sổ Chatbot được tích hợp tinh tế, cho phép người dùng đặt câu hỏi bất cứ lúc nào. Giao diện này hỗ trợ tạo mới các đoạn chat, xem lại lịch sử tư vấn hoặc xóa các phiên làm việc cũ. Phản hồi từ Chatbot được trình bày theo định dạng dễ đọc, hỗ trợ các đoạn trích dẫn văn bản pháp luật giúp tăng cường tính pháp lý cho các chỉ dẫn.

Hình 3. Giao diện Chatbot

3.4.4. Sidebar điều hướng và Dashboard quản trị

Sidebar (thanh điều hướng bên trái) thay đổi linh hoạt dựa trên vai trò của người dùng. Đối với quản trị viên, sidebar cung cấp lối tắt đến các công cụ quản lý người dùng, quản lý tổ chức và các danh mục thông tin hàng hóa. Dashboard thống kê sử dụng các biểu đồ trực quan để hiển thị lượt tìm kiếm và tương tác AI, giúp nhà quản lý nắm bắt "sức khỏe" của hệ thống và xu hướng luân chuyển hàng hóa tại cảng một cách nhanh chóng.

Hình 4. Giao diện sidebar

Bảng 2. Về trải nghiệm người dùng

Giao diện	Đặc điểm nổi bật	Đối tượng sử dụng chính
Trang chủ	Giới thiệu, tin tức cập nhật IMDG Code	Mọi người dùng
Tìm kiếm UN	Tốc độ cao, có lịch sử tìm kiếm	Thuyền viên, nhân viên cảng
Trang chi tiết	Đầy đủ P-code, Segregation, Labels	Sĩ quan an toàn, kiểm hóa
Cửa sổ Chatbot	Ngôn ngữ tự nhiên, trích dẫn chuẩn xác	Nhân viên hiện trường
Admin Dashboard	Biểu đồ thống kê, quản lý dữ liệu tập trung	Quản trị viên, chuyên gia CNTT

3.5. Lợi ích vận hành và giá trị thực tiễn tại cảng biển Việt Nam

Việc ứng dụng hệ thống NetX vào thực tế khai thác cảng mang lại những thay đổi mang tính đột phá về cả hiệu quả kinh tế lẫn mức độ an toàn hàng hải.

3.5.1. Nâng cao hiệu quả tác nghiệp hiện trường

Sự thay đổi lớn nhất nằm ở tốc độ và độ chính xác của thông tin. Thay vì mất 5 - 15 phút để tra cứu thủ công qua sách giấy, nhân viên cảng giờ đây chỉ mất chưa đầy 10 giây để có được đầy đủ hướng dẫn về một loại hàng nguy hiểm. Điều này đặc biệt quan trọng trong quy trình gate-in (tiếp nhận container tại cổng cảng), giúp giảm thiểu tình trạng ùn tắc và đảm bảo mọi container đều được dán nhãn đúng quy định trước khi vào bãi. Khả năng truy cập 24/7 giúp giải quyết bài toán làm việc theo ca kíp tại cảng, đảm bảo an toàn luôn được duy trì ở mức cao nhất bất kể thời điểm nào trong ngày.

3.5.2. Giảm thiểu rủi ro từ yếu tố con người

Với sự hỗ trợ của Chatbot AI và các cảnh báo tự động về phân tách, NetX giúp loại bỏ những sai sót chủ quan do thiếu kinh nghiệm hoặc áp lực công việc của nhân viên. Hệ thống đóng vai trò như một lớp màng lọc an toàn, đảm bảo các loại hàng kỵ nhau không bao giờ được xếp gần nhau, từ đó phòng ngừa hiệu quả các sự cố cháy nổ hóa chất - những thảm họa có thể gây thiệt hại vô cùng lớn về tài sản và uy tín cảng. Đặc biệt, tính năng trích dẫn nguồn của Chatbot giúp người dùng tự tin hơn trong việc ra quyết định, vì mọi chỉ dẫn đều dựa trên "tài liệu vàng" đã được kiểm duyệt.

3.5.3. Lợi ích kinh tế và tính bền vững của giải pháp nội địa

Sử dụng NetX giúp các doanh nghiệp cảng biển và vận tải Việt Nam tiết kiệm đáng kể chi phí bản quyền hàng năm so với các dịch vụ quốc tế. Việc làm chủ một nền tảng công nghệ nội địa còn cho phép tùy biến linh hoạt theo các quy định riêng của pháp luật Việt Nam, điều mà các phần mềm quốc tế thường bỏ qua. Về lâu dài, hệ thống góp phần thúc đẩy lộ trình chuyển đổi số của ngành Hàng hải, nâng cao năng lực cạnh tranh của các cảng biển Việt Nam trong việc tiếp nhận các tàu container thế hệ mới mang theo lượng lớn hàng nguy hiểm phức tạp.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống tra cứu trực tuyến NetX (netx.com.vn) là một giải pháp công nghệ hiện đại, đáp ứng kịp thời nhu cầu cấp thiết về kiểm soát hàng nguy hiểm theo tiêu chuẩn IMDG Code 2024 tại Việt Nam. Bằng việc kết hợp sức mạnh của trí tuệ nhân tạo (AI) với quy trình nghiệp vụ hàng hải chuẩn hóa, NetX không chỉ đơn giản hóa công tác tra cứu mà còn tạo ra một tiêu chuẩn mới về an toàn và hiệu quả trong quản trị cảng biển. Sự phối hợp đa ngành giữa các chuyên gia hàng hải và chuyên gia công nghệ thông tin đã tạo ra một sản phẩm có tính ứng dụng cao, thân thiện với người dùng và mang lại giá trị kinh tế thực tiễn cho doanh nghiệp. Trong tương lai, việc tiếp tục mở rộng các tính năng tích hợp và cập nhật tri thức sẽ giúp NetX khẳng định vị thế là một "trợ lý thông minh" không thể thiếu, góp phần đưa ngành Hàng hải Việt Nam tiến gần hơn tới tiêu chuẩn cảng biển thông minh và an toàn trên trường quốc tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hazcheck Online. Dangerous Goods compliance tool for maritime industry. Internet: https://hazcheck.com/ (accessed: 15/8/2025).

[2] International Maritime Organization. International Maritime Dangerous Goods Code 2024 (Amendment 42-24), London, 2024.

[3] International Maritime Organization. IMO inspection data on dangerous goods shipments - 34% Deficiency Report, 2025.

[4] Sedge AI. From 48 Hours to 10 Minutes: How AI is Transforming Maritime Dangerous Goods Operations. Internet: https://www.sedge.ai/post/from-48-hours-to-10-minutes-how-ai-is-transforming-maritime-dangerous-goods-operations (accessed: 12/02/2026).

[5] P. Lewis, et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2020.

[6] OpenAI. Vector Embeddings technical documentation - text-embedding-3-large model, 2024.

[7] T. Zhang, et al. RAFT: Adapting Language Models to Domain-Specific RAG. arXiv:2403.10131, 2024.

[8] S. Es, et al. RAGAS: Automated Evaluation of Retrieval Augmented Generation. arXiv:2309.15217, 2023.

[9] S. R. Chidamber and C. F. Kemerer. A metrics suite for object oriented design. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994.

[10] T. J. McCabe. A Complexity Measure. IEEE Transactions on Software Engineering, 1976.

[11] P. J. Clarkson, et al. Predicting Change Propagation in Complex Design. ASME Journal of Mechanical Design, 2004.

[12] McKinsey & Company. The Future of Maritime Automation and AI in Dangerous Goods Management, 2023.

[13] Sedge AI. From 48 Hours to 10 Minutes: How AI is Transforming Maritime Dangerous Goods Operations. White Paper, 2024.

[14] ICHCA. IMDG Code Amendment 42-24: Summary of main changes and operational impact, 2025.

[15] E. Barberi, et al. Leveraging Artificial Intelligence for Real-Time Risk Detection in Ship Navigation. Applied Sciences (MDPI), vol. 15, no. 21, p. 11674, 2025.

[16] M. N. O. Sadiku, et al. Artificial Intelligence in Maritime Industry. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 2025.

[17] L. Chimakurthi. Reliable RAG: Implementing Semantic Double-Pass Merging for Technical Content, 2024.

[18] Asia Classification Society. Maritime RAG Benchmark: 500 expert-validated Q&A pairs for ship classification. SSMI Conference, 2022.

[19] Reach24h. IMDG Code Amendment 42-24 Takes Effect: What Global Shippers Must Prepare for by 2026, 2025.

[20] D. Dalaklis. Artificial Intelligence (AI) Applications and the Shipping Industry. TransNav Journal, 2025.

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu phương án kỹ thuật đo đạc kiểm tra độ lệch công trình vòng quay mặt trời Sun Wheel

Research on technical method for surveying the deviation of the Sun Wheel

> NGUYỄN NGỌC ANH, HOÀNG MAI PHƯƠNG, NGUYỄN ĐẠT HIẾU, LƯU THỊ KIM THÚY, TS NGUYỄN XUÂN THỊNH*
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: thinhms@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Phương án đo đạc công trình bằng công nghệ định vị chính xác cao đang trở thành xu thế quan trọng trong lĩnh vực quan trắc và giám sát biến dạng công trình trên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này xây dựng phương án kỹ thuật đo đạc và đánh giá kết quả kiểm tra độ lệch của công trình Sun Wheel Hạ Long. Phương án đo đạc này cho phép đánh giá chính xác sự dịch chuyển không gian của kết cấu sau khi chịu tác động của bão, phát hiện kịp thời các biến dạng bất thường, từ đó đưa ra cảnh báo sớm nhằm bảo đảm an toàn cho công trình và du khách. Phương án kỹ thuật được đề xuất dựa trên nguyên lý đo đạc độ lệch công trình bằng công nghệ định vị chính xác cao, kết hợp với phân tích dữ liệu biến dạng theo chuỗi thời gian tại 16 vị trí đo tương ứng với 16 vòng quay, giúp xác định sai lệch hình học của toàn bộ hệ thống vòng quay. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương án đề xuất có độ chính xác cao, chi phí hợp lý, phù hợp với điều kiện thực tiễn tại Việt Nam và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật quốc tế, góp phần nâng cao hiệu quả công tác giám sát, bảo trì và đảm bảo an toàn vận hành đối với các công trình du lịch quy mô lớn.

Từ khóa: Phương án kỹ thuật đo đạc; công nghệ định vị chính xác cao; đánh giá kết quả; kiểm tra độ lệch; Sun Wheel.

ABSTRACT

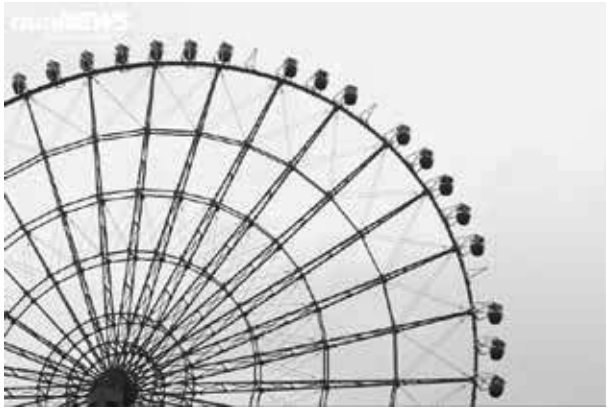
The application of high-precision positioning technology in structural surveying has become an important trend in monitoring and deformation assessment of engineering structures worldwide, including in Vietnam. Based on this context, this study develops a technical surveying method and evaluates the results of deviation inspection for the Sun Wheel Ha Long structure. The proposed surveying approach enables accurate assessment of the spatial displacement of the structure after being affected by extreme events such as storms, allowing early detection of abnormal deformations and providing a basis for timely warnings to ensure the safety of both the structure and visitors. The proposed technical method is based on the principle of structural deviation measurement using high-precision positioning technology combined with time-series deformation data analysis. Measurements are conducted at 16 observation points corresponding to 16 rotational positions of the wheel, enabling the identification of geometric deviations of the entire wheel system. The results indicate that the proposed method provides high accuracy, reasonable cost and good applicability under Vietnamese conditions while meeting international technical standards. The study therefore contributes to improving monitoring efficiency, maintenance management and operational safety for large-scale tourism structures.

Keywords: Surveying technical method; high-precision positioning technology; result evaluation; deviation inspection; Sun Wheel.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năm 2024, cơn bão Yagi đổ bộ vào Quảng Ninh đã gây ra những thiệt hại nặng nề, trong đó hệ thống Vòng quay Mặt trời Sun Wheel Hạ Long bị ảnh hưởng đặc biệt nghiêm trọng. Thống kê cho thấy, hệ thống kết cấu trụ và khung thép đã chịu va đập mạnh từ cabin và khung treo cũng như từ hệ thống truyền động, đồng thời chịu tác động trực tiếp của gió bão, dẫn đến tình trạng xô lệch không gian với giá trị sai lệch vượt quá trị số cho phép. Hệ thống khung treo cabin có 3/64 cabin rơi xuống đất và hư hại hoàn toàn, 61 cabin còn lại cũng bị ảnh hưởng ở các mức độ khác nhau. Hệ thống truyền động gồm cụm thủy lực, hộp tốc độ, bánh tỳ và giá đỡ bị phá hủy toàn bộ, trong khi hệ thống điện, chống sét, chiếu sáng,

âm thanh, thông tin liên lạc và điều khiển cũng hư hỏng hoàn toàn.



Hình 1. Một số cabin của vòng quay đã bị rơi

Đặc thù của Sun Wheel là công trình có kích thước siêu lớn với kết cấu trục quay và vành chịu tải trọng tập trung, rất nhạy cảm với các biến dạng hình học do tác động của gió, nhiệt độ và lún nền. Điều này đặt ra yêu cầu bắt buộc về các phép đo có độ chính xác cao đến từng milimet tại nhiều vị trí khác nhau trên toàn bộ kết cấu. Lựa chọn phương án đo đạc kiểm tra độ lệch nổi bật với những ưu thế vượt trội: Khả năng đo chính xác trên phạm vi lớn, phù hợp với quy mô công trình đặc thù, cho phép giám sát đồng bộ tại 16 điểm cố định trong suốt 16 vòng quay, từ đó đưa ra kết quả đánh giá định lượng về độ lệch tại từng vị trí khi công trình vận hành.

Thực tế quốc tế cũng đã chứng minh hiệu quả của phương án này: Nhật Bản thường xuyên áp dụng đo dao động và độ lệch cho các Ferris Wheel tại Tokyo Dome City sau động đất; Singapore Flyer (cao 165 m, đường kính 150 m) được giám sát bằng phương pháp đo dịch chuyển để đảm bảo an toàn sau các trận bão lớn [1]; London Eye tại Anh (cao 135 m, đường kính 120 m) cũng triển khai các phép đo nghiêng - lệch định kỳ để kiểm soát biến dạng do gió mạnh trên sông Thames [2]. Như vậy, Sun Wheel Hạ Long (một trong những vòng quay lớn ở châu Á) lựa chọn phương án đo đạc kiểm tra độ lệch là hoàn toàn phù hợp với chuẩn mực quốc tế.

Phương án đo đạc kiểm tra độ lệch được coi là tối ưu bởi sự cân bằng giữa tính chuẩn mực quốc tế, độ chính xác kỹ thuật, chi phí hợp lý và khả năng áp dụng rộng rãi. Không chỉ đảm bảo an toàn công trình và sự tin cậy cho du khách, phương án này còn tạo lợi thế cạnh tranh cho du lịch Việt Nam, đồng thời phù hợp với xu thế quản lý công trình hiện đại trên thế giới. Đây chính là giải pháp kết hợp hài hòa giữa công nghệ tiên tiến và điều kiện thực tiễn trong nước, đóng vai trò quan trọng trong việc tái thiết hạ tầng, phát triển du lịch bền vững và hội nhập toàn cầu.

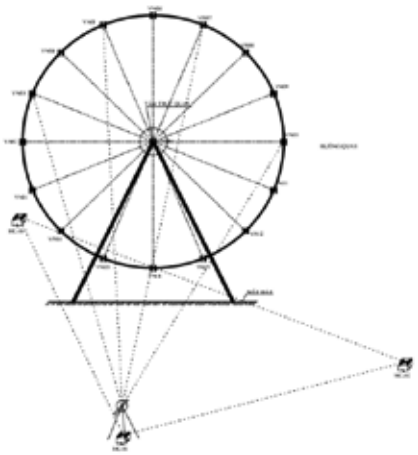
2. PHƯƠNG PHÁP QUAN TRẮC BIẾN DẠNG VÀ THỰC NGHIỆM

2.1. Yêu cầu và cơ sở khoa học

Trong xây dựng, quan trắc biến dạng là một công tác không thể thiếu nhằm bảo đảm độ bền vững và an toàn cho công trình trong cả giai đoạn thi công lẫn vận hành. Đối với công trình vòng quay, tính chất đặc biệt và quy mô của nó đòi hỏi quy trình quan trắc phải tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn kỹ thuật. Căn cứ theo TCVN 9399-2012 - Nhà và công trình xây dựng [3]: Xác định chuyển dịch ngang bằng phương pháp trắc địa, công trình được xếp vào cấp 1, tức nhóm có yêu cầu khắt khe nhất, với sai số trung phương cho phép chỉ từ 1 - 5 mm. Đây cũng là mức áp dụng cho các công trình quan trọng, có thời gian sử dụng dài hạn và mang ý nghĩa đặc biệt.

2.2. Hệ thống mốc chuẩn

Để tiến hành quan trắc, ba mốc chuẩn (MC-01, MC-02, MC-03) có độ chính xác tương đương tam giác - Giải tích cấp 1, được xây dựng tại những vị trí ổn định, không chịu tác động ngoại lực và không ảnh hưởng đến hoạt động thi công. Các mốc này được đo xác định bằng phương pháp tam giác tự do, sử dụng máy toàn đạc điện tử kết hợp GPS, đồng thời được kiểm tra định kỳ để bảo đảm độ tin cậy. Trên cơ sở ba mốc chính, các mốc phụ được phát triển thêm nhằm hỗ trợ quá trình đo kiểm tra vòng quay.

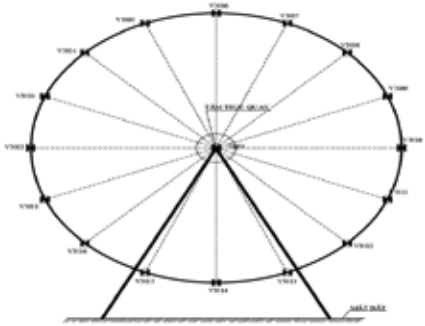


Hình 2. Sơ đồ mốc chuẩn thực hiện quan trắc MC-01,02,03

2.3. Các điểm quan trắc trên vòng quay

Trên vòng ngoài của vòng quay, bố trí 16 điểm quan trắc (VN01 - VN16), mỗi điểm được gắn gương phản xạ để phục vụ đo đạc. Hệ thống này cho phép ghi nhận dữ liệu dịch chuyển ở nhiều vị trí, phản ánh toàn diện trạng thái biến dạng của công trình trong quá trình vận hành.

Vị trí gắn gương được thể hiện trong hình dưới như sau:



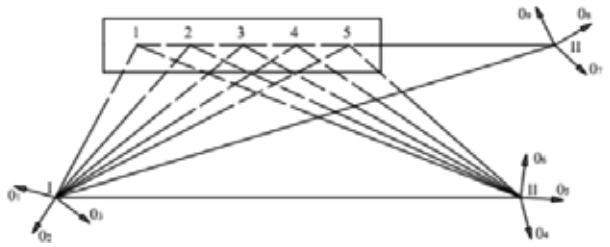
Hình 3. Vị trí gắn gương các vị trí trên vòng xoay

Hình 4. Gương dán các vị trí trên vòng quay

2.4. Phương pháp thực hiện

Công tác quan trắc được triển khai theo phương pháp đo góc

- cạnh (hay đo hướng), được quy định trong TCVN 9399-2012. Đây là phương pháp phù hợp cho các công trình có nhiều điểm kiểm tra và khó thiết lập hướng chuẩn. Trong mỗi chu kỳ, máy toàn đạc được đặt tại mốc chuẩn MC-01, định hướng tới mốc bất kỳ rồi lần lượt đo các điểm từ VN01 đến VN16. Khi vòng quay dịch chuyển 22,5°, một lần đo mới được thực hiện. Sau 16 lần, toàn bộ vòng quay 360° được ghi nhận, thu được 256 điểm dữ liệu.



Hình 5. Quan trắc chuyển dịch ngang bằng phương pháp đo góc cạnh

Mỗi chu kỳ quan trắc được tiến hành như sau: Đo kiểm tra độ ổn định của các mốc cơ sở bằng cách dùng phương pháp đo góc, cạnh giữa các điểm cơ sở và điểm kiểm tra, so sánh kết quả đo giữa các chu kỳ và tính giá trị thay đổi hướng của các điểm kiểm tra.

Độ chuyển dịch của điểm kiểm tra được tính theo công thức:

$$q_i = l_i \times \frac{\Delta\beta_i''}{p''} \quad (1)$$

Trong đó: li là khoảng cách từ điểm cơ sở đến điểm kiểm tra i; Δβi là lượng thay đổi hướng đến điểm kiểm tra i giữa hai chu kỳ quan trắc.

Sai số trung phương xác định đại lượng chuyển dịch của điểm i được tính theo công thức:

$$m_{qi} = l_i \cdot \frac{m_{\Delta\beta i}}{p''} \quad (2)$$

Nếu các hướng được đo cùng độ chính xác trong các chu kỳ quan trắc thì:

$$m_{qi} = l_i \times \sqrt{2} \times \frac{m_{\beta''}}{p''} \quad (3)$$

Dùng máy toàn đạc điện tử đo các điểm đã gắn trên vòng quay bằng sơ đồ như sau:

2.5. Thiết bị sử dụng và công tác bố trí thực nghiệm

Công tác quan trắc sử dụng hệ thống thiết bị hiện đại, bao gồm: Máy toàn đạc điện tử Leica TS06, TS07 hoặc tương đương với độ chính xác cao (1+2 ppm, sai số đo góc 1"), bộ đàm liên lạc, máy tính xách tay cài đặt phần mềm xử lý chuyên dụng và sổ đo hiện trường. Tất cả thiết bị được kiểm định và nghiệm thu trước khi đưa vào sử dụng, bảo đảm độ tin cậy của toàn bộ quá trình.

Hình 6. Máy toàn đạc điện tử Leica TS06

Hình 7. Gương 360° cố định trên vòng quay

Hình 8. Vị trí mốc quan trắc ngoài thực địa

2.6. Kiểm soát chất lượng và biện pháp an toàn thực hiện trong quá trình quan trắc

Công tác quan trắc biến dạng được triển khai theo một quy trình chặt chẽ, bảo đảm tính khoa học, độ tin cậy và tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành. Tổ chức thực hiện được bố trí với một tổ sản xuất gồm 5 nhân sự, có trình độ chuyên môn phù hợp, đảm nhiệm đồng thời hai hạng mục chính là quan trắc ngoại nghiệp và xử lý nội nghiệp. Trong đó, công tác ngoại nghiệp tập trung vào việc đo đạc trực tiếp tại hiện trường, ghi chép và kiểm tra số liệu hằng ngày, bảo đảm độ chính xác ngay từ khâu thu thập dữ liệu ban đầu. Công tác nội nghiệp được tiến hành song song, bao gồm nhập liệu, tính toán, xử lý bằng phần mềm chuyên dụng, hiệu chỉnh sai số và hoàn thiện hồ sơ kỹ thuật.

Tất cả thiết bị quan trắc được kiểm nghiệm và hiệu chuẩn trước khi sử dụng, nhằm đảm bảo độ chính xác phù hợp với tiêu chuẩn, quy phạm cũng như đề cương được phê duyệt. Quá trình quan trắc được thực hiện theo đúng phương án kỹ thuật đã đề ra, có sự giám sát trực tiếp của chủ nhiệm hoặc cán bộ kỹ thuật phụ trách hiện trường. Sau khi thu thập và xử lý sơ bộ, số liệu được kiểm tra, đối soát với kết quả ngoài thực địa, từ đó phát hiện và điều chỉnh kịp thời các sai lệch. Công tác xử lý số liệu được tiến hành trên nền tảng phần mềm bản quyền, bảo đảm tính hợp lệ và khả năng truy xuất của dữ liệu.

Quy trình tổ chức và kiểm soát chất lượng như trên không chỉ đảm bảo yêu cầu kỹ thuật và tiến độ mà còn nâng cao tính minh bạch, khả năng kiểm chứng của dữ liệu quan trắc. Đây là cơ sở khoa học và thực tiễn quan trọng để đảm bảo độ tin cậy của công tác quan trắc biến dạng.

Trong quá trình quan trắc cần có các thiết bị bảo hộ để đảm bảo an toàn trong quá trình thi công bằng cách lập kế hoạch quan trắc trước từ khâu vị trí đặt máy, đường di chuyển và thời điểm đo; trang bị cho công nhân, kỹ sư bảo hộ cá nhân như mũ bảo hộ, áo phản quang, gang tay, giày bảo hộ…

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

3.1. Thống kê kết quả độ lệch vòng đo thử nghiệm

Bảng 1. Bảng đánh giá độ lệch so với tâm

Vòng đo số: 01			
TT	**Tên điểm gương**	**Chênh lệch với tâm (m)**	**Ghi chú**
1	M6	-	-
2	M5	0.006	Lệch phải
3	M7	0,021	Lệch trái
4	M4	0,024	Lệch trái
5	M8	0,028	Lệch trái
6	M3	0,013	Lệch trái
7	M2	0,003	Lệch phải
8	M1	0,022	Lệch phải
9	M16	0,048	Lệch phải
10	M12	0,022	Lệch phải
11	M15	0,015	Lệch phải
12	M13	0,028	Lệch phải
13	M14	-	-

Bảng 2. Bảng đánh giá độ lệch so với vòng 1 (cố định các góc của vòng 1)

Vòng đo số: 02			
TT	**Tên điểm gương**	**Chênh lệch với tâm (m)**	**Ghi chú**
1	M5	0,023	Lệch phải
2	M4	0,019	Lệch trái
3	M6	0,019	Lệch phải
4	M3	0,007	Lệch trái
5	M7	0,001	Lệch trái
6	M2	0,006	Lệch trái
7	M1	0,007	Lệch phải
8	M16	0,040	Lệch phải
9	M15	0,002	Lệch trái
10	M11	0,001	Lệch phải
11	M14	0,034	Lệch trái
12	M12	0,005	Lệch trái
13	M13	0,003	Lệch trái

3.2. Đánh giá số liệu

Qua kết quả đo đạc thực nghiệm thể hiện số liệu đo chênh lệch giữa các vòng đo là căn cứ để hiệu chỉnh lại vị trí ban đầu của vòng quay, từ đó là cơ sở để hiệu chỉnh vòng quay và sau khi hiệu chỉnh lần 1 sẽ tiếp tục đo đạc kiểm tra khảo sát để có thể hiệu chỉnh đến khi vòng quay trở lại vị trí ban đầu.

4. KẾT LUẬN

- Phương án kỹ thuật đo kiểm tra độ lệch công trình vòng quay Mặt trời Sun Wheel hoàn toàn phù hợp với cơ sở pháp lý và hệ thống tiêu chuẩn, quy phạm ngành hiện hành.
- Công tác quan trắc ngoài hiện trường được đề xuất dựa trên phương án kỹ thuật đã xây dựng, bảo đảm độ chính xác và tính đầy đủ của số liệu, phục vụ cho việc đánh giá biến dạng công trình cũng như cung cấp cơ sở dữ liệu tin cậy cho thiết kế, thi công và quản lý khai thác.
- Kết quả nghiên cứu có thể xem như tài liệu tham khảo khoa học, làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo, đồng thời hỗ trợ các đơn vị quản lý trong việc ứng dụng và triển khai phương án quan trắc đối với những công trình quy mô tương tự trong thực tiễn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số SV25-26.46.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Singapore Flyer. Fun facts. Internet: https://www.singaporeflyer.com/en/fun-facts (truy cập tháng 02/2026).

[2] Wikipedia. London Eye. Internet: https://en.wikipedia.org/wiki/London_Eye (truy cập tháng 02/2026).

[3] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 9399:2012. Nhà và công trình xây dựng: Xác định chuyển dịch ngang bằng phương pháp trắc địa, Hà Nội, NXB. Xây dựng, 2012.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 14/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Lập trình công cụ và phân tích biến động lớp phủ bề mặt đất từ dữ liệu GIS viễn thám - thực nghiệm tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh

Development of computational tools and analysis of land cover dynamics using remote sensing-based gis data: an experimental study in Long An ward, Tay Ninh province

> **THS HOÀNG HỮU ĐỨC*, TS NGUYỄN VĂN KHÁNH, KS TRẦN NGUYỄN TUẤN PHÁT**
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP Hồ Chí Minh
*Email: hhduc@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Biến động lớp phủ bề mặt đất tại phường Long An đang diễn ra nhanh chóng dưới tác động của quá trình đô thị hóa. Việc theo dõi sự thay đổi này bằng các phương pháp truyền thống thường mất nhiều thời gian, chi phí và khó đảm bảo tính cập nhật, đặt ra yêu cầu về một phương pháp hiện đại, hiệu quả và có độ chính xác cao. Trong bối cảnh đó, công nghệ GIS và Viễn thám ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ ưu thế vượt trội, phân tích và thể hiện dữ liệu không gian. Ảnh vệ tinh Sentinel-2 với độ phân giải phù hợp và chu kỳ lặp ngắn cho phép trích xuất thông tin lớp phủ theo chuỗi thời gian nhanh chóng. Bên cạnh đó, lập trình GIS giúp tự động hóa quy trình, tăng hiệu suất xử lý và hạn chế sai sót. Với phương pháp nghiên cứu đáng tin cậy như phương pháp thu thập dữ liệu, xử lý dữ liệu, GIS, kết quả nghiên cứu đã xây dựng được cơ sở dữ liệu lớp phủ bề mặt đất cho hai thời điểm năm 2019 và 2025, bản đồ biến động lớp phủ giai đoạn 2019 - 2025, cùng hệ thống WebGIS hỗ trợ hiển thị và chia sẻ thông tin trực quan, cho thấy phương pháp Viễn thám - GIS kết hợp với lập trình công cụ tự động hóa và tích hợp lên WebGIS là hoàn toàn khả thi.

Từ khóa: Viễn thám; GIS; WebGIS.

ABSTRACT

Land cover change in Long An Ward has been occurring rapidly under the impact of urbanization. Monitoring these changes using traditional methods is often time-consuming, costly and difficult to update regularly, highlighting the need for modern and efficient approaches. In this context, Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing technologies have been widely applied due to their advantages in spatial data analysis and visualization. Sentinel-2 satellite imagery, with suitable spatial resolution and a short revisit cycle, enables rapid extraction of multi-temporal land cover information. In addition, GIS programming helps automate workflows, improve processing efficiency and reduce potential errors. The study applied several methods, including data collection, data processing and GIS analysis. The results produced a land cover database for 2019 and 2025, a land cover change map for the 2019 - 2025 period and a WebGIS system to support visualization and information sharing. The findings indicate that integrating RS and GIS with automated tools and WebGIS platforms is a feasible approach for monitoring land cover changes.

Keywords: Remote Sensing; GIS; WebGIS.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phường Long An, tỉnh Tây Ninh đang có tốc độ đô thị hóa và công nghiệp hóa ngày càng tăng, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam sáp nhập tỉnh Tây Ninh và Long An cũ, lấy tên là Tây Ninh và đặt trụ sở chính tại phường Tân An. Quá trình biến động sử dụng đất diễn ra nhanh chóng. Việc theo dõi và đánh giá những biến động này là cần thiết để đảm bảo phát triển bền vững và giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường. Công nghệ Viễn thám và GIS là những công cụ hiện đại, hiệu quả trong việc phân tích và quản lý dữ liệu không gian, cho phép theo dõi biến động lớp phủ mặt đất với độ chính xác cao và phạm vi rộng [8]. Việc phối hợp dữ liệu cũng như các chức năng sẵn có của hai công nghệ để khai thác tối đa việc cung cấp thông tin phục vụ lập kế hoạch, chính sách và chiến lược phát triển kinh tế - xã hội. Việc phân tích biến động lớp phủ bề mặt đất cần được thực hiện thường xuyên và liên tục, đặt ra yêu cầu cần có công cụ tự động hóa quá trình này. Hiện nay, ngôn ngữ lập trình python được sử dụng rất phổ biến để lập trình các công cụ phân tích chạy trên nền GIS. Qua một số nghiên cứu như Ứng dụng GIS và

viễn thám trong phân tích biến động lớp phủ bề mặt huyện Mường La, tỉnh Sơn La giai đoạn 2000 - 2020 (Luận văn thạc sĩ Nguyễn, Q. H. (2020)) [3], Ứng dụng công nghệ viễn thám và WebGIS giám sát sử dụng đất TP Hà Nội đến năm 2020, Doãn, H. P., & Hoàng, T. T. (2013), Tạp chí Khoa học và Công nghệ [7]. Lập trình GIS xây dựng công cụ theo dõi nhiệt độ bề mặt tại tỉnh Bình Dương giai đoạn 1995 - 2024 bằng chuỗi ảnh Landsat. Tạp chí Trắc địa - Bản đồ, Nguyễn Trọng Nhân, & Tô Nguyễn Nhật Khôi (2024) [6] đã cho thấy hiệu quả của việc sử dụng ngôn ngữ lập trình python lập trình công cụ tự động xử lý dữ liệu GIS, Viễn thám để phục vụ phân tích biến động và chia sẻ thông tin lên WebGIS là hoàn toàn khả thi.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp thu thập dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 được thu thập từ Website Cơ quan Vũ trụ châu Âu (ESA - European Space Agency) [1] và dữ liệu ranh giới hành chính sau sáp nhập tỉnh thành theo Nghị quyết số 202/2025/QH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh [5] và ranh giới hành chính cấp phường xã theo Nghị quyết 1682/NQ-UBTVQH15 Về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Tây Ninh năm 2025 [4].

2.2. Phương pháp xử lý dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng phần mềm Snap để xử lý đồng nhất độ phân giải không gian của ảnh và phân loại ảnh thành 4 loại lớp phủ là Đất xây dựng, Đất trống, Mặt nước, Thực vật theo phương pháp Maximum Likelihood Classification trên phần mềm Envi 5.3.

Phương pháp Maximum Likelihood được áp dụng khá phổ biến và được xem là thuật toán chuẩn để so sánh với các thuật toán khác được sử dụng trong xử lý ảnh viễn thám. MLC được xây dựng dựa trên cơ sở giả thuyết hàm mật độ xác suất tuân theo luật phân bố chuẩn. Mỗi pixel được tính xác suất thuộc vào một loại nào đó và nó được chỉ định gán tên loại mà xác suất thuộc vào lớn đó lớn nhất [9].

2.3. Phương pháp GIS

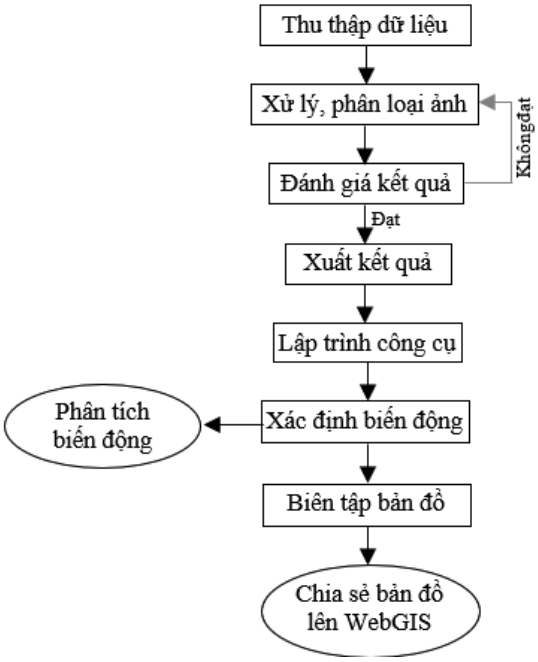
Ứng dụng GIS trong việc trực quan hóa dữ liệu biên tập bản đồ và lập trình công cụ tự động phục vụ phân tích biến động lớp phủ bề mặt đồng thời Publish bản đồ lên WebGIS [2].

2.4. Phương pháp thực nghiệm

Nghiên cứu tiến hành thực nghiệm tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh giai đoạn 2019 - 2025. Đây là khu vực nội thành của tỉnh Tây Ninh, có tốc độ đô thị hóa nhanh, sự biến động các lớp phủ bề mặt diễn ra nhanh chóng.

3. THỰC NGHIỆM

3.1. Quy trình thực nghiệm



Hình 1. Sơ đồ Quy trình thực nghiệm

3.2. Thu thập dữ liệu

Tác giả sử dụng ảnh Sentinel-2 với mức xử lý Level-2A để tiến hành phân loại lớp phủ bề mặt. Ảnh được lựa chọn theo các tiêu chí sau:

- Khu vực: Phường Long An, tỉnh Tây Ninh.
- Thời gian: Mùa khô (tháng 1 đến tháng 3) của các năm 2019 và 2025.
- Độ phủ mây: Dưới 10%, nhằm đảm bảo chất lượng ảnh đầu vào.
- Ranh giới hành chính mới sau sáp nhập tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh.

3.3. Xử lý phân loại ảnh

Qua quá trình phân tích để xác định các loại lớp phủ bề mặt đất, tác giải đã lựa chọn phân loại ảnh thành 4 loại lớp phủ Đất xây dựng, Đất trống, Mặt nước, Thực vật, với tiêu chí như sau:

Bảng 1. Xác định lớp phủ và khóa giải đoán

Lớp phủ		Tổ hợp màu 432	Ảnh thực địa	Mô tả
Cấp I	Cấp II			
Mặt đất	Đất xây dựng			- Khu dân cư: Có màu trắng. Kích thước không cố định. Cấu trúc mịn hoặc lóm đóm tùy khu vực. Có hình dáng bất kỳ. - Giao thông: Có dạng tuyến, có màu đậm. Kích thước nhỏ, hẹp.
	Đất trống			- Đất trống: Cấu trúc lốm đốm. Khu vực kích thước lớn, có hình dáng không xác định.

Mặt nước	**Mặt nước**			- Có màu đôi khi ngả đen với nước có tạp chất. Dạng tuyến đối với sông hồ, kênh rạch, có cấu trúc mịn. Dạng vùng (đa giác hoặc chữ nhật) đối với mặt nước nuôi trồng thủy sản.
Thực vật	**Thực vật**			- Có cấu trúc lốm đốm, hình dáng ô hình chữ nhật nếu là ruộng, không xác định nếu là cây xanh trong khu vực đô thị hoặc cây mọc hoang.

Quá trình chọn mẫu huấn luyện được thực hiện trên phần mềm Envi 5.3. Sau khi chọn mẫu, tác giả tiến hành kiểm tra, đánh giá độ lẫn giữa các mẫu để đảm bảo sự tách biệt giữa các mẫu nằm trong giới hạn cho phép. Kết quả đánh giá độ lẫn giữa các mẫu đã chọn được thể hiện ở bảng sau:

Bảng 2. Chỉ số phân tách giữa các mẫu

Các cặp đánh giá	Năm 2019	Năm 2025
Đất trống và Đất xây dựng	1,98890455	1,98681742
Thủy hệ và Đất xây dựng	1,99610390	1,92838887
Thực vật và Đất trống	1,99999270	1,98176450
Thực vật và Đất xây dựng	1,99999889	1,99772276
Thủy hệ và Đất trống	1,99999957	1,99799997
Thực vật và Thủy hệ	1,99999998	1,99981101

Kết quả cho thấy, các cặp mẫu bị lẫn nhiều nhất như là Đất trống và Đất xây dựng với giá trị độ lẫn năm 2019 và 2025 lần lượt là 1,98890455, 1,98681742 với giá trị này độ lẫn giữa các mẫu vẫn nằm trong ngưỡng cho phép để phân loại. Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phân loại Maximum Likelihood Classification tiến hành phân loại ảnh.

3.4. Đánh giá độ chính xác kết quả phân loại

Để đánh giá độ chính xác sau phân loại, tác giả đã sử dụng ma trận sai số phân loại và chỉ số Kappa [9].

- Ma trận sai số là một ma trận vuông, trong đó số hàng và số cột tương ứng với số loại lớp phủ đã phân loại trước đó. Từ bảng ma trận sai số cung cấp cho ta các chỉ số đo lường của việc tính toán chính xác như độ chính xác tổng thể, phần trăm của sai số bỏ sót và sai số nhầm lẫn, sai số người sản xuất và người sử dụng.

Giả thiết n pixels được phân thành K loại, một ma trận sai số với K hàng và K cột dùng để thể hiện sự phù hợp giữa những loại thực trên mặt đất và những loại giải đoán.

Gọi O_{ij} là giá trị thể hiện sự phù hợp ở hàng i và cột j của ma trận K*K, khi đó tổng theo hàng là S_{i+} (i =1,2,..,K) và tổng hàng là S_{+j} (j = 1, 2,...,K):

Bảng 3. Ma trận sai số phân loại

Loại lớp phủ thực vật	Loại được giải đoán					
	(1)	(2)	…	(K-1)	(K)	Tổng cộng
(1)	O_{11}	O_{12}	…	O_{1K-1}	O_{1K}	S_{1+}
(2)	O_{21}	O_{22}	…	O_{2K-1}	O_{2K}	S_{2+}
…	…	…	…	…	…	…
(K-1)	O_{K-11}	O_{K-12}	…	O_{K-1K-1}	O_{K-1K}	S_{K-1+}
(K)	O_{K1}	O_{K2}	…	O_{KK-1}	O_{KK}	S_{K+}
Tổng cộng	S_{+1}	S_{+2}	…	S_{+K-1}	S_{+K}	$n = \sum_{j=1}^{K}\sum_{i=1}^{K} O_{ji}$

Trong đó: K là số lớp phủ bề mặt;

- N là tổng số pixel trong bộ lưu trữ;
- S_{+j} là tổng theo cột;
- S_{i+} là tổng theo hàng;
- $\sum_{i=1}^{K} O_{ij} = S_{i+}$ (loại bề mặt); Với S_{i+} (i = 1,2,…,K);
- $\sum_{i=1}^{K} O_{ij} = S_{+j}$ (loại giải đoán); Với S_{+j} (i = 1,2,…,K).

Tỷ lệ phần trăm sai số bỏ sót là phần trăm của các pixel mà lẽ ra phải nằm trong các lớp đã đưa ra nhưng trên thực tế lại không có.

$$t_{i+} = \frac{S_{i+} - O_{ii}}{S_{i+}} x\ 100\%$$

Tỷ lệ phần trăm sai số thực hiện là phần trăm của các pixel nằm trong các lớp đã đưa ra trong khi thực tế chúng lại thuộc về các lớp khác.

$$t_{+j} = \frac{S_{+j} - O_{ii}}{S_{+j}} x\ 100\%$$

Trong đó:

O_{ii}, O_{jj} là số pixel được phân loại đúng nằm trên đường chéo.

- Chỉ số Kappa (K) nhằm thống kê kiểm tra và đánh giá sự phù hợp giữa những nguồn dữ liệu khác nhau hoặc khi áp dụng các thuật toán khác nhau.

Cách xác định chỉ số Kappa được thể hiện ở công thức như sau:

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+} \times n}{N^2 - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+} \times n_{+i}}$$

Trong đó: k là tổng số cột trong ma trận sai số;

- n_{ii} là số mẫu phân loại đúng (đường chéo);
- n_{i+} là tổng số mẫu tại hàng i;
- n_{+i} là tổng số mẫu tại cột i;
- N là tổng số mẫu đánh giá.

Khi K = 1, độ chính xác phân loại là tuyệt đối.

Bảng 4. Ma trận sai số phân loại ảnh năm 2019

	Thực vật	Thủy hệ	Đất trống	Đất xây dựng	Tổng
Thực vật	98	0	3	2	103
Thủy hệ	0	20	0	2	22
Đất trống	3	1	75	15	94
Đất xây dựng	4	0	12	116	132
Tổng	105	21	90	135	**351**
Sai số bỏ sót	4,85%	9,09%	20,21%	12,12%	
Sai số thực hiện	6,67%	4,76%	16,67%	14,07%	
Độ chính xác toàn cục	88,03%				
Kappa	0,82				

Bảng 5. Ma trận sai số phân loại ảnh năm 2025

	Thực vật	Thủy hệ	Đất trống	Đất xây dựng	Tổng
Thực vật	156	0	2	3	161
Thủy hệ	0	11	0	2	13
Đất trống	9	0	31	8	48
Đất xây dựng	9	0	5	113	127
Tổng	**174**	**11**	**38**	**126**	**349**
Sai số bỏ sót	**3,11%**	**15,38%**	**35,42%**	**11,02%**	
Sai số thực hiện	**10,34%**	**0,00%**	**18,42%**	**10,32%**	
Độ chính xác toàn cục	**89,11%**				
Kappa	**0,83**				

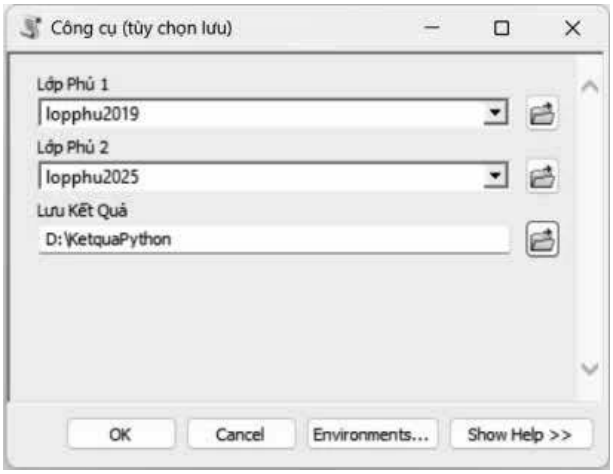
3.5. Lập trình công cụ phân tích biến động

Công cụ phân tích biến động lớp phủ bề mặt tự động được lập trình bởi ngôn ngữ lập trình Python. Kết quả lập trình được mô tả như sau:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import arcpy, os
arcpy.env.overwriteOutput = True

# 0: Lop phu 1 | 1: Lop phu 2 | 2: Thu muc output
in_lp1  = arcpy.GetParameterAsText(0)
in_lp2  = arcpy.GetParameterAsText(1)
out_dir = arcpy.GetParameterAsText(2)

if not os.path.exists(out_dir):
   os.makedirs(out_dir)

# dat ten file dau ra
out_chonglop = os.path.join(out_dir, "ChongLop.shp")  # ket qua Intersect
out_bando    = os.path.join(out_dir, "BanDo.shp")     # ket qua Dissolve

# Buoc 1: Chong lop truc tiep hai lop phu
arcpy.Intersect_analysis([in_lp1, in_lp2], out_chonglop)

# Buoc 2: Them truong BienDong
arcpy.AddField_management(out_chonglop, "BienDong", "TEXT", field_length=20)

# Buoc 3: Tinh BienDong bang Python
codeBlock = """def getChange(a, b):
   if a == b:
      return a
   else:
      return str(a) + " -> " + str(b)
"""
arcpy.CalculateField_management(out_chonglop,"BienDong", "getChange(!Loai_a!, !Loai_b!)","PYTHON_9.3",codeBlock)

# Buoc 4: Dissolve theo Loai_a, Loai_b, BienDong va tinh SUM dien tich
arcpy.Dissolve_management(out_chonglop,out_bando,"Loai_a;Loai_b;BienDong","Area SUM","MULTI_PART","DISSOLVE_LINES")

print("Xong! Ket qua: {}".format(out_bando))
```

Hình 2. Kết quả Code lập trình công cụ phân tích biến động

Giao diện công cụ phân tích biến động khởi chạy trong phần mềm ArcGIS.



Hình 3. Công cụ tự động xử lý dữ liệu phục vụ phân tích biến động

Kết quả phân tích biến động diện tích các loại lớp phủ.

Bảng 6. Bảng ma trận biến động diện tích (ha)

Thực vật		Năm 2025				
		Thủy hệ	Đất trống	Xây dựng	Tổng	
Năm 2019	Thực vật	898,42	12,58	17,71	112,42	1.041,13
	Thủy hệ	21,87	169,05	0,65	17,74	209,31
	Đất trống	521,9	2,2	32,87	339,29	896,26
	Xây dựng	171,1	17,41	10,57	1.145,68	1.344,76
	Tổng	1.613,29	201,24	61,8	1.615,13	3.491,46

Kết quả thống kê diện tích các loại lớp phủ tăng giảm trong giai đoạn năm 2019 - 2025.

Bảng 7. Thống kê diện tích tặng giảm của các loại lớp phủ

Lớp phủ bề mặt	Năm 2019		Năm 2025		Biến động Tăng (+) Giảm (-)	
	Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)	Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)	Diện tích (ha)	Tỷ lệ (%)
Thực vật	1.041,13	29,8%	1.613,29	46,2%	572,16	16,4%

Thủy hệ	209,31	6,0%	201,24	5,8%	-8,07	-0,2%
Đất trống	896,26	25,7%	61,8	1,8%	-834,46	-23,9%
Xây dựng	1.344,76	38,5%	1615,13	46,3%	270,37	7,7%

Dựa vào bảng kết quả thống kê diện tích và biểu đồ thống kê ta thấy tổng diện tích lớp phủ xây dựng chiếm số lượng rất lớn so với các lớp phủ khác, năm 2019 chiếm 38,5% đến năm 2025 chiếm đến 46,3%. Như vậy có thể nói phường Long An, tỉnh Tây Ninh có tốc độ đô thị hóa nhanh chóng, gần một nửa diện tích là lớp phủ đất xây dựng. Tuy nhiên, trong quá trình đô thị, diện tích cây xanh cũng chiếm tỷ lệ rất lớn, đặc biệt là khi đô thị phát triển diện tích lớp phủ đất xây dựng tăng 7,7% thì diện tích lớp phủ thực vật cũng tăng lên 16,4%. Như vậy, song song với việc phát triển đô thị, phường Long An đã phát triển thêm cây xanh hướng tới phát triển bền vững.

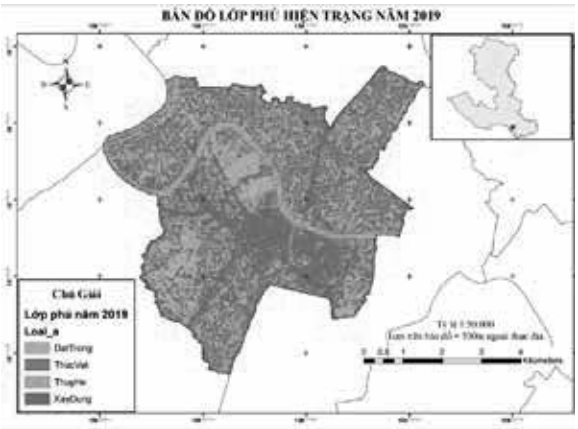
Đối với diện tích lớp phủ đất trống giảm xuống rõ rệt, giảm đến gần 24%, chủ yếu được chuyển qua lớp phủ xây dựng và lớp phủ thực vật, cho thấy phường đã đưa diện tích lớp đất trống vào khai thác hợp lý hiệu quả không để tình trạng đất hoang hóa gây lãng phí.

Bên cạnh đó cũng có một phần rất nhỏ diện tích lớp phủ thủy hệ bị giảm đi có thể do quá trình cải tạo kênh nước, san lấp mặt bằng xây dựng đô thị, hoặc một phần do quá trình phân loại một số pixel bị lẫn.

Hình 4. Biểu đồ thống kê diện tích lớp phủ năm 2019, 2025

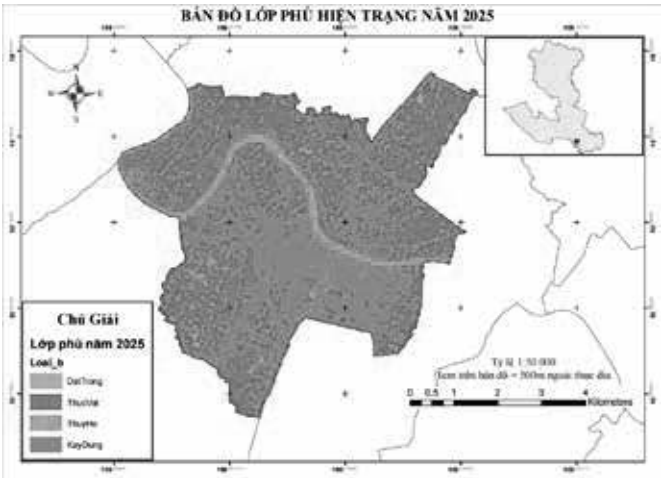
Kết quả các loại bản đồ được biên tập trên phần mềm ArcGIS và Publish lên WebGIS.

Kết quả bản đồ hiện trạng lớp phủ bề mặt năm 2019.



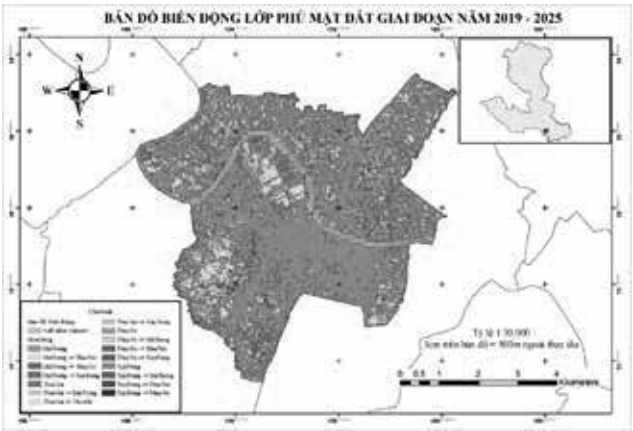
Hình 5. Bản đồ hiện trạng lớp phủ năm 2019

Kết quả bản đồ hiện trạng lớp phủ bề mặt năm 2025.



Hình 6. Bản đồ lớp phủ hiện trạng năm 2025

Kết quả bản đồ biến động lớp phủ bề mặt đất giai đoạn năm 2019 - 2025.



Hình 7. Bản đồ biến động lớp phủ bề mặt đất giai đoạn năm 2019 - 2025

3.6. Chia sẻ dữ liệu lên WebGIS

Ứng dụng Visual Studio Code tạo tạo WebGIS chia sẻ bản đồ biến động, tạo giao diện WebGIS liên kết cơ sở dữ liệu của bản đồ lên PostSQL, Pushing lên Geoserver.

3.7. Thảo luận

GIS và Viễn thám đã giúp thể hiện rõ sự phân bố và thay đổi của các loại hình lớp phủ bề mặt đất tại phường Long An qua giai đoạn năm 2019 - 2025. Các vùng biến động như chuyển từ đất trống sang công trình hay từ thực vật sang đất trống được thể hiện bằng màu sắc nổi bật, giúp nhận diện nhanh những khu vực thay đổi mạnh. Quy trình thực hiện biến động được thực hiện tự động thông qua công cụ lập trình GIS hỗ trợ xử lý liệu nhanh hơn, giảm sai sót so với tính toán thủ công. Đồng thời, việc tích hợp kết quả bản đồ lên WebGIS giúp quá trình xem bản đồ, tra cứu thông tin và quan sát sự thay đổi theo thời gian trở nên trực quan và thuận tiện. Các kết quả đạt được cho thấy, việc kết hợp ảnh Sentinel-2, phân tích GIS, công cụ tự động và WebGIS mang lại hiệu quả cao trong nghiên cứu biến động lớp phủ bề mặt đất.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành lập được bản đồ lớp phủ bề mặt đất của phường Long An tại hai thời điểm 2019 và 2025, đồng thời xây dựng bản đồ biến động lớp phủ cho giai đoạn 2019 - 2025. Các kết quả cho thấy sự thay đổi rõ rệt giữa các loại hình lớp phủ, trong đó diện

Hình 8. Bản đồ biến động lớp phủ bề mặt được chia sẻ trên WebGIS

tích công trình tăng lên tại nhiều khu vực, trong khi đất trống và thực vật giảm ở một số vị trí. Việc trực quan hóa dữ liệu thành bản đồ giúp nhận diện nhanh các vùng biến động mạnh và đặc trưng của từng dạng chuyển đổi.

Qua nghiên cứu cũng cho thấy ứng dụng GIS và Viễn thám là phương pháp hiệu quả trong phân tích biến động lớp phủ với ưu điểm tiết kiệm thời gian, chi phí và đảm bảo độ chính xác cần thiết. Dữ liệu được xây dựng và lưu trữ thống nhất trên môi trường GIS giúp dễ dàng cập nhật, đồng bộ và khai thác sử dụng lâu dài. Công cụ tự động xử lý dữ liệu được lập trình đã hỗ trợ tính toán biến động nhanh hơn, giảm sai sót so với thao tác thủ công và có khả năng mở rộng cho các cơ sở dữ liệu khác.

Bên cạnh đó, hệ thống WebGIS được xây dựng đã tích hợp toàn bộ kết quả phân tích, cho phép hiển thị và tra cứu thông tin biến động trực quan, nhanh chóng và thuận tiện. Khả năng truy cập rộng rãi của WebGIS mở ra hướng tiếp cận hiện đại trong chia sẻ dữ liệu không gian và hỗ trợ tốt cho các nghiên cứu tiếp theo. Kết quả đạt được khẳng định tính khả thi và hiệu quả của việc kết hợp ảnh Sentinel-2, GIS, lập trình và WebGIS trong phân tích biến động bề mặt đất, đồng thời có thể mở rộng ứng dụng cho nhiều lĩnh vực khác liên quan đến phân tích và quản lý dữ liệu không gian.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Agency. Ảnh vệ tinh Sentinel-2. Cơ quan Vũ trụ châu Âu (ESA - European Space). Internet: https://dataspace.copernicus.eu/ (truy cập ngày 06/01/2026).

[2] Cường, Vũ Xuân và Tuấn, Vũ Minh. Lý thuyết và thực hành GIS đại cương. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2016.

[3] H, Nguyễn Q. Ứng dụng GIS và viễn thám trong phân tích biến động lớp phủ bề mặt huyện Mường La, tỉnh Sơn La giai đoạn 2000 - 2020. Luận văn Thạc sĩ, 2020.

[4] Quốc hội. Nghị quyết 1682/NQ-UBTVQH15 Về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Tây Ninh năm 2025, 2025.

[5] Quốc hội. Nghị quyết số 202/2025/QH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh, 2025.

[6] Nhân, Nguyễn Trọng và Khôi, Tô Nguyễn Nhật. Lập trình GIS xây dựng công cụ theo dõi nhiệt độ bề mặt tại tỉnh Bình Dương giai đoạn 1995 - 2024 bằng chuỗi ảnh Landsat. Tạp chí Trắc địa - Bản đồ, 2024.

[7] Phong, Doãn Hà và Tùng, Hoàng Thanh. Ứng dụng công nghệ viễn thám và WebGIS giám sát sử dụng đất thành phố Hà Nội đến năm 2020. Tạp chí Khoa học và Công nghệ (22), 2013.

[8] Prabu và P.Dar. Land-use/cover change in Coimbatore urban area (Tamil Nadu, India)-a remote sensing and GIS-based study. Environmental Monitoring and Assessment, 2018.

[9] Trung, Lê Văn. Giáo trình Viễn thám. Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2015.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

Bộ điều khiển trượt thích nghi tích hợp bộ quan sát nhiễu cho hệ thống vây giảm lắc ngang tàu thủy

Adaptive sliding mode controller for ship antiroll fin stabilization based on disturbance observer

> PGS.TS NGUYỄN VĂN SƯỚNG*, THS PHẠM TẤT TIỆP, THS PHẠM VĂN LUÂN
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenvansuong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bài báo này, bộ điều khiển trượt thích nghi được phát triển cho hệ thống vây giảm lắc tàu thủy dựa trên sự tích hợp với bộ quan sát nhiễu. Hệ thống điều khiển đề xuất đảm bảo hiệu quả giảm lắc dưới các ảnh hưởng của bất định mô hình và nhiễu sóng bên ngoài không xác định. Trước tiên, bộ quan sát được thiết kế để dự đoán nhiễu sóng biển để bù cho luật điều khiển, sau đó luật điều khiển trượt được đề xuất để ổn định lắc dưới tác động của nhiễu song biển. Để xử lý tính bất định của hệ thống động lực học, cơ cấu thích nghi được tích hợp trong luật điều khiển. Tính ổn định của hệ thống điều khiển với bộ điều khiển đề xuất được chứng minh thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov. Mô phỏng Matlab được thực hiện để kiểm chứng tính khả thi của thuật toán điều khiển đề xuất.

Từ khóa: Hệ thống vây giảm lắc tàu thủy; điều khiển trượt thích nghi; bộ quan sát nhiễu.

ABSTRACT

In this paper, an adaptive sliding mode controller is developed for a ship roll stabilization based on the integration with a disturbance observer. The proposed control system ensures roll reduction effectiveness under the influence of model uncertainties and unknown external wave disturbances. First, the disturbance observer is designed to estimate sea wave disturbances and to compensate for the control law; subsequently, the sliding mode control law is proposed to stabilize the roll motion under wave excitation. To handle the uncertainties of the dynamic system, an adaptive mechanism is integrated into the control law. The stability of the control system with the proposed controller is proven through Lyapunov stability theory. MATLAB simulations are performed to verify the feasibility of the proposed control algorithm.

Keywords: Ship anti-roll fin stabilizer; adaptive sliding mode control; disturbance observer.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chuyển động lắc của tàu thủy gây ra nhiều vấn đề tiêu cực đến khả năng vận hành, sức khỏe của thuyền viên, hành khách cũng như sự an toàn của hàng hóa. Để khắc phục vấn đề này, nhiều giải pháp giảm lắc đã được triển khai như: Két nước chữ U giảm lắc, con quay, hệ thống Rotor Magnus và đặc biệt là hệ thống vây giảm lắc. Với hiệu suất giảm lắc lên đến 92% và không chiếm không gian thân tàu như các thiết bị khác, vây giảm lắc là thiết bị được các tàu du thuyền cỡ lớn lắp đặt nhiều hơn cả. Xét về phương diện thực tiễn, thuật toán PID vẫn là lựa chọn phổ biến nhất nhờ cấu trúc đơn giản và dễ hiệu chỉnh. Tuy nhiên, bộ điều khiển này vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể như hiệu quả giảm lắc hạn chế khi tồn tại bất định trong mô hình và đặc biệt bộ điều khiển này không có khả năng kháng nhiễu tốt khi nhiễu sóng biển lớn. Để khắc phục nhược điểm của PID, nhiều phương pháp điều khiển hiện đại đã được ứng dụng. Trong nghiên cứu [3], chiến lược điều khiển bền vững dựa trên độ lợi L2 xét đến sai số mô hình vây giảm lắc, hay điều khiển tối ưu H vô cùng [14] giảm lắc cho tàu chiến. Xét về khía cạnh điều khiển tối ưu, có các tiếp cận như tối ưu tuyến tính bậc hai kết hợp khâu phân tích chế độ động lực học [2], hay các tiếp cận điều khiển dự báo mô hình trong [4, 12] được nghiên cứu để giải quyết bài toán ràng buộc tốc độ của vây giảm lắc. Mặt khác, với tiếp cận phương pháp thiết kế Lyapunov, nhiều nghiên cứu vây giảm lắc tàu thủy đã được đề xuất với nền tảng ứng dụng điều khiển trượt hay điều khiển cuốn chiếu. Cụ thể, các nghiên cứu dựa trên điều khiển trượt bao gồm: Ba luật điều khiển trượt bền vững trong [10]; bộ điều khiển trượt với hiệu

quả đặt trước [5]; bộ điều khiển trượt tích hợp đạo hàm cấp phân số [13]; bộ điều khiển trượt kiểu tỉ lệ-vi phân-tích phân [11] để giảm hiện tượng rung ảnh hưởng đến cơ cấu chấp hành và điều khiển trượt tích hợp mặt trượt dừng nhanh trong [1] để đưa hệ thống vây giảm lắc về ổn định nhanh chóng. Bên cạnh đó, các thuật toán điều khiển mạng nơ-ron cũng được đề xuất để giải quyết bài toán bất định cấu trúc trong hệ thống ổn định lắc tàu thủy trong các nghiên cứu [8, 9].

Thực tế, sau khoảng thời gian khai thác, mô hình động lực học tàu thủy sẽ bị biến đổi so với thời điểm xác định ban đầu và sự biến đổi các tham số động học trong mô hình được gọi là bất định tham số. Mặt khác, cũng không có các cảm biến để xác định ảnh hưởng của nhiễu sóng biển lên tàu. Do vậy, làm thế nào để thiết kế bộ điều khiển ổn định lắc tàu thủy xét đến ảnh hưởng đồng thời của mô hình bất định tàu thủy và nhiễu sóng biển không xác định là bài toán vẫn chưa được giải quyết cho đến nay trong lĩnh vực ổn định lắc tàu thủy. Để giải quyết bài toán đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một chiến lược điều khiển dựa trên sự kết hợp của điều khiển trượt với bộ quan sát nhiễu và cơ cấu thích nghi. Thứ nhất, điều khiển trượt làm nền tảng để giải quyết tính ổn định của toàn hệ thống giảm lắc, trong khi đó bộ quan sát nhiễu cung cấp giá trị bù nhiễu cho điều khiển trượt. Bên cạnh đó, luật thích nghi được thiết kế trong thành phần bền vững để đảm bảo hệ thống ổn định khi có sai số trong bộ quan sát nhiễu. Để kiểm chứng hiệu quả của chiến lược điều khiển đề xuất, mô phỏng số được thực hiện.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA LẮC NGANG TÀU THỦY

Hình 1. Hệ thống vây giảm lắc ngang tàu thủy

Theo [8], mô hình toán học của hệ thống vây giảm lắc tàu thủy (Hình 1) được mô tả theo hệ thức dưới đây:

$$(M_{xx}+\Delta M_{xx})\ddot{\varphi}+\lambda_{\mathrm{n}}\dot{\varphi}+\lambda_{\mathrm{w}}\dot{\varphi}\,|\,\dot{\varphi}\,|+Dh\varphi(1-\left(\frac{\varphi}{\varphi_{\mathrm{v}}}\right)^2)=M_{\mathrm{c}}+M_{\mathrm{w}} \quad (1)$$

Trong đó: $(M_{xx}+\Delta M_{xx})$ là mô-men tác động lên tàu thủy; φ là góc lắc tàu, $\dot{\varphi}$ là tốc độ lắc tàu; φ_{v} là góc ngập nước của tàu; λ_{n} và λ_{w} tương ứng là các hệ số ổn định; *D* và *h* là lượng giãn nước và chiều cao tâm nghiêng của tàu; M_{c} là mô-men chống lắc do vây giảm lắc tạo ra, M_{w} là mô-men gây lắc tàu do sóng gió kết hợp gây ra. Các thành phần trong hệ thức (1) được xác định theo hệ thức (2) dưới đây:

$$\begin{aligned}
&M_{xx}+\Delta M_{xx}=\frac{DB^2}{g}(0.3085+\frac{0.0227B}{dr}-\frac{0.0043L_{\mathrm{BP}}}{100})^2\\
&\lambda_{\mathrm{n}}=\frac{2n_1\sqrt{Dh(M_{xx}+\Delta M_{xx})}}{\pi}\\
&\lambda_{\mathrm{w}}=\frac{3n_2(M_{xx}+\Delta M_{xx})}{4}\\
&M_{\mathrm{c}}=-\rho v^2A_{\mathrm{f}}l_{\mathrm{f}}C_1(u+\frac{\dot{\varphi}l_{\mathrm{f}}}{v})\\
&M_{\mathrm{w}}=-Dha_{\mathrm{w}}
\end{aligned} \quad (2)$$

Thay các thành phần trong (2) vào (1) và viết lại phương trình (1) dưới dạng sau:

$$\ddot{\varphi}=\gamma_1\varphi+\gamma_2\varphi^3+\gamma_3\dot{\varphi}+\gamma_4\dot{\varphi}\left|\dot{\varphi}\right|+bu+d_w \quad (3)$$

Trong hệ thức (3), các hệ số được xác định theo hệ thức (4) dưới đây:

$$\begin{aligned}
&\gamma_1=-\frac{Dh}{M_{xx}+\Delta M_{xx}};\gamma_2=\frac{Dh}{(M_{xx}+\Delta M_{xx})\varphi_v^2};\gamma_3=-\frac{\delta_N}{M_{xx}+\Delta M_{xx}}-\frac{\rho v^2A_{\mathrm{f}}l_{\mathrm{f}}C_1}{(M_{xx}+\Delta M_{xx})v}\\
&\gamma_4=-\frac{\delta_{\mathrm{W}}}{M_{xx}+\Delta M_{xx}};b=-\frac{\rho v^2A_{\mathrm{f}}l_{\mathrm{f}}C_1}{(M_{xx}+\Delta M_{xx})};d_w=-\frac{Dha_w}{M_{xx}+\Delta M_{xx}}
\end{aligned} \quad (4)$$

Đặt $x_1=\varphi$ và $x_2=\dot{\varphi}$, $x=[x_1,x_2]^T$, phương trình động học (3) được viết lại dưới dạng phương trình không gian trạng thái như dưới đây:

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=f(x)+bu+d_w\end{cases} \quad (5)$$

Trong phương trình (5), hàm động lực học được viết như sau:

$$f(x)=\gamma_1x_1+\gamma_2{x_1}^3+\gamma_3x_2+\gamma_4x_2\left|x_2\right| \quad (6)$$

Giả sử sau khoảng thời gian khai thác, các hệ số động lực học bị thay đổi nên hàm động lực học $f(x)$ bị tăng thêm lượng bất định:

$$\Delta f(x)=\Delta\gamma_1x_1+\Delta\gamma_2{x_1}^3+\Delta\gamma_3x_2+\Delta\gamma_4x_2\left|x_2\right| \quad (7)$$

Phương trình động lực học (5) của hệ thống được viết gọn lại dưới dạng như sau:

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=f(x)+bu+d\end{cases} \quad (8)$$

Trong đó: $d=\Delta f(x)+d_w$ là nhiễu tổng hợp của sóng biển bên ngoài và bất định mô hình.

Mục tiêu của bài toán là thiết kế một bộ điều khiển để đầu ra của hệ thống (góc lắc tàu thực tế) được ổn định về không với các điều kiện bất định tham số mô hình $\Delta f(x)$ và nhiễu bên ngoài d_w không xác định. Để thực hiện mục tiêu này, bộ điều khiển trượt thích nghi được tích hợp với bộ quan sát nhiễu được đề xuất.

3. BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI TÍCH HỢP BỘ QUAN SÁT NHIỄU CHO HỆ THỐNG VÂY GIẢM LẮC NGANG TÀU THỦY

Trong phần này, lý thuyết bộ quan sát nhiễu và bộ điều khiển trượt thích nghi được đề xuất cho hệ thống vây giảm lắc ngang tàu thủy. Sau đó, lý thuyết ổn định Lyapunov được sử dụng để chứng minh tính ổn định của hệ thống điều khiển đề xuất.

3.1. Bộ quan sát nhiễu

Dựa trên mô hình (8), bộ quan sát nhiễu được thiết kế như sau:

$$\begin{cases}\hat{d}=z+Lx_2\\ \dot{z}=-L(f(x)+bu+\hat{d})\end{cases} \quad (9)$$

Trong đó: *z* là biến trung gian; $\hat{d}$ là đầu ra của bộ quan sát nhiễu và giá trị này sẽ được đưa vào luật điều khiển để bù cho nhiễu không thể xác định *d*; $L\geq 0$ là hệ số của bộ quan sát nhiễu. Đầu vào của bộ quan sát nhiễu là tín hiệu điều khiển u và các trạng thái tàu $x=[x_1,x_2]^T$.

Để chứng minh tính hội tụ của bộ quan sát nhiễu (9), hàm Lyapunov được xác định như sau:

$$V_1=\frac{1}{2}\tilde{d}^2 \quad (10)$$

Trong đó: $\tilde{d}=d-\hat{d}$ là sai số của bộ quan sát nhiễu. Thực tế vì nhiễu sóng biển thay đổi chậm, nên $\dot{d}\approx 0$.

Lấy đạo hàm (10) theo thời gian và thay phương trình thứ nhất của hệ (9) vào ta được:

$$\dot{V}_1=\tilde{d}\dot{\tilde{d}}=-\tilde{d}\dot{\hat{d}}=-\tilde{d}(\dot{z}+L\dot{x}_2) \quad (11)$$

Mặt khác, thay phương trình thứ hai của bộ quan sát (9) và

thành phần động lực học (8) vào (11) ta được:

$$\dot{V}_1 = -L\tilde{d}^2 \le 0 \quad (12)$$

Theo (12), bộ quan sát thiết kế (9) đảm bảo tính hội tụ để quan sát nhiễu không biết trong phương trình động lực học (8).

3.2. Bộ điều khiển trượt thích nghi

Thiết kế mặt trượt như sau:

$$s = x_2 + \alpha x_1 \quad (13)$$

Lấy đạo hàm mặt trượt (13) theo thời gian và thay (8) vào ta được:

$$\dot{s} = f(x) + bu + d + \alpha x_2 \quad (14)$$

Hàm Lyapunov được chọn để ổn định hệ thống vây giảm lắc:

$$V_2 = \frac{1}{2}s^2 \quad (15)$$

Lấy đạo hàm (15) theo thời gian và thay (14) vào, ta được hệ thức sau:

$$\dot{V}_2 = s.\dot{s} = s.\left(f(x) + bu + d + \alpha x_2\right) \quad (16)$$

Để hệ thống ổn định cần lựa chọn luật điều khiển *u* để $\dot{V}_2 \le 0$. Như vậy, *u* được lựa chọn như sau:

$$u = \frac{1}{b}.\left(-f(x) - \alpha x_2 - \hat{d} - \hat{\theta}\mathrm{sig}(s)\right) \quad (17)$$

Trong luật điều khiển (17), $\hat{d}$ là đầu ra của bộ quan sát nhiễu (9) và $\hat{\theta}$ü (s) là thành phần bền vững để kéo trạng thái hệ thống về mặt trượt *s*. Vì thành phần bất định $\Delta f(x)$ trong nhiễu tổng hợp *d* có thể thay đổi nhanh nên sai số của bộ quan sát nhiễu $\tilde{d}$ có thể không hội tụ. Để khắc phục điều này, đại lượng $\hat{\theta}$ được đưa vào để ước lượng giá trị chặn θ^* của $\tilde{d}$. Luật thích nghi cho $\hat{\theta}$ được thiết kế:

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma\left|s\right| \quad (18)$$

Trong (18), Γ là hằng số thích nghi, được chọn là số dương.

3.3. Phân tích tính ổn định hệ thống

Gọi hàm Lyapunov tổng hợp của hệ thống như sau:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\tilde{d}^2 + \frac{1}{2\Gamma}\tilde{\theta}^2 \quad (19)$$

Lấy đạo hàm (19) theo thời gian và thay các phương trình (12) và (16) vào ta được:

$$\dot{V} = s.\left(f(x) + bu + d + \alpha x_2\right) - L\tilde{d}^2 - \frac{1}{\Gamma}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}} \quad (20)$$

Thay luật điều khiển (17) và luật thích nghi (18) vào (20) ta có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s.\left(\tilde{d} - \hat{\theta}\mathrm{sig}(s)\right) - L\tilde{d}^2 - \tilde{\theta}\left|s\right| \\ &= s\tilde{d} - \hat{\theta}\left|s\right| - \tilde{\theta}\left|s\right| - L\tilde{d}^2\end{aligned} \quad (21)$$

Vì $\hat{\theta}$ là ước lượng giá trị chặn θ^* của $\tilde{d}$, nên $\tilde{d} \le \theta^* = \hat{\theta} + \tilde{\theta}$. Như vậy, $s\tilde{d} - \hat{\theta}\left|s\right| - \tilde{\theta}\left|s\right| \le 0$ và $-L\tilde{d}^2 \le 0$ khi $L \ge 0$. Do đó, $\dot{V} \le 0$ và hệ thống điều khiển sẽ ổn định tiệm cận với luật điều khiển (17), luật thích nghi (18) và bộ quan sát nhiễu (9).

4. MÔ PHỎNG SỐ

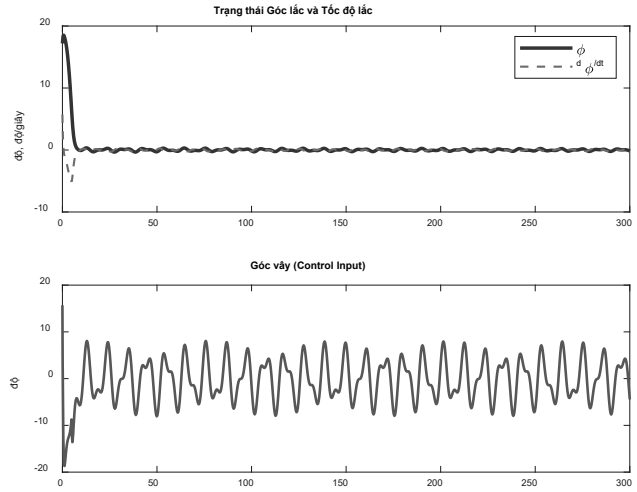
Để kiểm chứng tính khả thi của bộ điều khiển trượt thích nghi tích hợp bộ quan sát nhiễu cho hệ thống giảm lắc ngang tàu thủy, mô phỏng số được thực hiện trên phần mềm MATLAB. Mô phỏng được thực hiện với một tàu như trong nghiên cứu [8] với các thông số của tàu được chỉ ra như Bảng 1. Như vậy, tham số của mô hình động học lắc tàu được xác định theo hệ thức (2) lần lượt là: γ_1 = -0,1117, γ_2 = 0,1938, γ_3 = -0,6438, γ_4 = -0,0131, *b* = -0,3283.

Nhiễu sóng biển được mô tả bởi hàm *dw* = 0,04.sin(0.6.t) + 0,02.sin(1.1.t). Tham số bộ điều khiển được chọn: α = 1,2, Γ = 0,8 và tham số của bộ quan sát nhiễu là *L* = 2. Thời gian mô phỏng là 300 giây, thời gian trích mẫu là 0,01 giây. Giả sử các tham số mô hình động lực học giữ nguyên trong 100 giây đầu tiên, sau đó các hệ số bị tăng thêm 30% (bất định tham số). Trạng thái ban đầu góc lắc và tốc độ lắc ban đầu lần lượt là 17,2 độ và 5.7 độ, trong khi đó tham số thích nghi ban đầu $\hat{\theta}$ = 0.

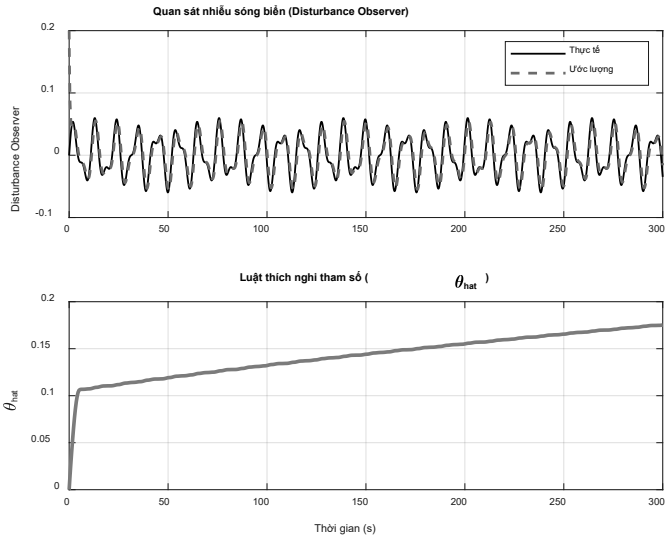
Bảng 1. Thông số tàu và hệ thống vây giảm lắc

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều dài tàu	*L*	175	m
Chiều rộng tàu	*B*	25,4	m
Mớn nước	*dr*	8,5	m
Lượng giãn nước	*D*	21.120	tấn
Chiều cao tâm nghiêng	*h*	1	m
Tốc độ tàu	*v*	15	knots

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong các Hình 2 và 3. Theo đó, Hình 2 chỉ ra góc lắc và tốc độ lắc được ổn định mặc dù có sự thay đổi các tham số động lực học của hệ thống (tăng thêm 30% - bất định) từ giây thứ 100. Góc lắc (nét liền) và tốc độ lắc (nét đứt) từ 17,2 độ và 5,7 độ được ổn định nhanh chóng về 0 sau 10 giây. Góc vây giảm lắc được điều khiển bởi bộ điều khiển cũng được chỉ ra trong Hình 2, có thể thấy góc vây được điều khiển nằm trong giới hạn ± 20 độ và phù hợp với cơ cấu chấp hành của vây giảm lắc.



Hình 2. Kết quả mô phỏng góc lắc được ổn định và tín hiệu điều khiển vây giảm lắc



Hình 3. Kết quả mô phỏng góc lắc được ổn định và tín hiệu điều khiển vây giảm lắc

Kết quả trong Hình 3 chỉ ra giá trị nhiễu biển ước lượng thông qua bộ quan sát (nét đứt) bám sát giá trị nhiễu biển thật (nét liền) tác động gây ra lắc tàu. Giá trị nhiễu ước lượng được đưa vào bộ điều khiển để dập nhiễu bên ngoài không xác định do không có cảm biến. Trong khi đó, tham số thích nghi được thay đổi từ 0 đến 0,17 để đảm bảo sự bền vững của hệ thống, tham số này làm nhiệm vụ ước lượng giá trị chặn của sai số bộ quan sát nhiễu. Kể cả khi có sai số trong bộ quan sát nhiễu có xu hướng làm hệ thống mất ổn định, tuy nhiên với sự thích nghi của tham số $\hat{\theta}$ trong thành phần tín hiệu bền vững $\hat{\theta}\mathrm{sig}(s)$, sai số của bộ quan sát nhiễu được chặn bởi $\hat{\theta}\mathrm{sig}(s)$và như vậy trạng thái của hệ thống luôn được kéo về ổn định.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã đề xuất một bộ điều khiển trượt tích hợp với cơ cấu mặt trượt dừng nhanh cho hệ thống giảm lắc ngang tàu thủy. Bộ điều khiển trượt đảm bảo tính ổn định và bền vững với nhiễu bên ngoài. Cơ cấu mặt trượt dừng nhanh giúp thời gian đi vào ổn định của hệ thống được giảm nhanh hơn so với luật điều khiển trượt cơ bản. Kết quả mô phỏng số đã chứng minh được tính khả thi của luật điều khiển đề xuất. Trong những nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi sẽ thực hiện tích hợp các kỹ thuật hiện đại khác như: thích nghi, bộ quan sát… vào luật điều khiển trượt dừng nhanh để giải quyết các bài toán khác nhau trong hệ thống giảm lắc tàu thủy.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số: DT.25-26.03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TS Nguyễn Văn Sướng. Bộ điều khiển trượt dừng nhanh cho hệ thống giảm lắc ngang tàu thủy với thời gian ổn định hữu hạn. Tạp chí Xây dựng, số 6, tr. 390-392, 2025.

[2] Cakici, F., Kahramanoglu, E. Numerical roll motion control by using fins based on the linear quadratic regulator and dynamic mode decomposition. Appl. Ocean Res. 142, 103828, 2024.

[3] Hinostroza, M.A., Luo, W., Soares, C.G. Robust fin control for ship roll stabilization based on L2-gain design. Ocean Eng. 94, 126-131, 2015.

[4] Jimoh, I.A., Kucukdemiral, I.B., Bevan, G. Fin control for ship roll motion stabilisation based on observer enhanced MPC with disturbance rate compensation. Ocean Eng. 224, 108706, 2021.

[5] Jin, Z., Zhang, W., Liu, S., Gu, M. Command-filtered backstepping integral sliding mode control with prescribed performance for ship roll stabilization. applied scien. 9, 4288, 01-13, 2019.

[6] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Aeeizh Publisher, 2002.

[7] Karakas, S., Ucer, E., Pesman, E. Control design of fin roll stabilization in beam seas based on Lyapunov's direct method. Pol. Marit. Res., 19, 25-30, 2012.

[8] Li, R., Li, T., Bai, W., Du, X. An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control. Neurocomputing 173, 953-957, 2016.

[9] Luo, W., Hu, B., Li, T. Neural network based fin control for ship roll stabilization with guaranteed robustness. Neurocomputing 230, 210-218, 2017.

[10] Moradi, M., Malekizade, H. Robust adaptive first-second-order sliding mode control to stabilize the uncertain fin-roll dynamic. Ocean Eng. 69, 18-23, 2013.

[11] Nguyen, Q. D., Li, T., Yuan, L., Shan, Q., Cao, Y. Sliding mode control for fin stabilizer system of marine vessels with PID sliding surface. 2018 International conference on security, pattern analysis, and cybernetics, 75-79, 2019.

[12] Perez, T., Goodwin, G.C. Constrained predictive control of ship fin stabilizers to prevent dynamic stall. Control Eng. Pract. 16, 482-494, 2007.

[13] Rezaei, A., Tabatabaei, M. Ship roll stabilization using an adaptive fractionalorder sliding mode controller. Ocean Eng. 287, 115883, 2023.

[14] Taskin, M., Guclu, R., Ahan, A.O. H_{inf} optimal control of DTMB 5415 combatant roll motion by using active fins with actuator saturations. Ocean Eng. 276, 114255, 2023.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Xây dựng lộ trình ưu tiên thực hành ESG tại cụm cảng container Hải Phòng: Tiếp cận bằng mô hình ra quyết định đa tiêu chí lai Fuzzy Delphi và Fuzzy AHP

Developing a priority roadmap for esg practices in the Haiphong container port cluster: A hybrid Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP multi-criteria decision-making approach

> TS TRẦN HẢI VIỆT*, TS NGUYỄN THỊ THÚY HỒNG, THS PHAN THỊ BÍCH NGỌC
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: tranhaiviet@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Ngành Hàng hải đang chuyển dịch mạnh mẽ sang mô hình "cảng xanh" và khung quản trị ESG trước áp lực phi carbon hóa cùng các quy định pháp lý khắt khe. Tại cụm cảng Hải Phòng, rào cản về vốn và công nghệ khiến việc thiếu lộ trình rõ ràng dễ dẫn đến đầu tư dàn trải. Để giải quyết, nghiên cứu ứng dụng mô hình ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) lai giữa Fuzzy Delphi và Fuzzy AHP. Quy trình bắt đầu bằng việc khảo sát 25 chuyên gia để chuẩn hóa bộ tiêu chí ESG đặc thù gồm 3 trụ cột và 9 tiêu chí thành phần. Sau đó, phương pháp Fuzzy AHP được sử dụng để lượng hóa và xác định trọng số ưu tiên, giúp khắc phục tính chủ quan và sự mơ hồ trong đánh giá chuyên gia. Kết quả cung cấp cơ sở khoa học để xây dựng danh mục hành động và lộ trình đầu tư bền vững đến năm 2030, tầm nhìn 2045, góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh xanh cho cụm cảng Hải Phòng.

Từ khóa: Cảng xanh; ESG; Fuzzy Delphi; Fuzzy AHP; Hải Phòng; ra quyết định đa tiêu chí.

ABSTRACT

The maritime industry is shifting significantly toward the "Green Port" model and ESG governance frameworks in response to decarbonization pressures and stringent legal regulations. In the Hai Phong port cluster, capital and technological barriers, coupled with the lack of a clear roadmap, often lead to fragmented investments. To address this, the study applies a hybrid Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) model combining Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP. The process begins by surveying 25 leading experts to standardize a specialized ESG criteria set consisting of 3 pillars and 9 component criteria. Subsequently, the Fuzzy AHP method is employed to quantify and determine priority weights, effectively mitigating subjectivity and ambiguity in expert linguistic assessments. The results provide a scientific foundation for developing a list of priority actions and a sustainable investment roadmap toward 2030, with a vision to 2045, contributing to the enhancement of green competitiveness for the Hai Phong port cluster.

Keywords: Green port; ESG; Fuzzy Delphi; Fuzzy AHP; Hai Phong; Multi-criteria decision-making.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành Hàng hải đang chuyển dịch mạnh mẽ sang mô hình "cảng xanh" tích hợp khung quản trị ESG để đáp ứng kỳ vọng của các bên liên quan [4]. Áp lực phi carbon hóa từ quốc tế [11] và các quy định pháp lý thắt chặt tại Việt Nam [1, 17] khiến việc thực thi ESG trở thành điều kiện tiên quyết để duy trì hoạt động và tiếp cận "vốn xanh" [12, 13]. Bên cạnh đó, quản trị ESG còn giúp nâng cao hình ảnh thương hiệu, lòng trung thành của chủ hàng và giảm thiểu rủi ro chiến lược [8, 15, 18]. Tuy nhiên, các quốc gia đang phát triển vẫn đối mặt với rào cản lớn về tài chính và công nghệ [6], đòi hỏi một phương pháp khoa học để tối ưu hóa nguồn lực thực thi. Là cửa ngõ lớn nhất miền Bắc, cụm cảng Hải Phòng đang chịu áp lực kép: Tuân thủ kiểm kê khí nhà kính nội địa [17] và đáp ứng tiêu chuẩn báo cáo bền vững từ các hãng tàu quốc tế [16]. Thách thức lớn nhất

nằm ở sự vận hành không đồng nhất giữa các bến cảng nước sâu hiện đại và cảng sông cũ [2], cùng sự thiếu hụt nguồn vốn cho công nghệ sạch [6]. Việc thiếu lộ trình rõ ràng dẫn đến đầu tư dàn trải, đòi hỏi phải xác định các hành động ưu tiên để không bị tụt hậu trong chuỗi cung ứng xanh toàn cầu. Nghiên cứu tập trung vào hệ sinh thái các bến cảng container tại Hải Phòng, bao gồm cả nhóm cảng nước sâu Lạch Huyện và nhóm cảng nội sông khu vực Đình Vũ - sông Cấm. Phạm vi nội dung dựa trên sự giao thoa giữa pháp lý quốc gia về cảng xanh và yêu cầu bền vững toàn cầu. Dữ liệu được khảo sát từ tháng 11/2025 đến tháng 01/2026 nhằm xây dựng giải pháp ưu tiên cho giai đoạn đến năm 2030, tầm nhìn 2045, góp phần nâng cao vị thế cạnh tranh xanh cho toàn thành phố trên bản đồ hàng hải quốc tế.

2. TỔNG QUAN TÀI LIỆU VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT ESG

Việc tích hợp ESG trong quản lý cảng biển đánh dấu sự chuyển dịch từ các giải pháp kỹ thuật bảo vệ môi trường đơn thuần sang một hệ thống quản trị bền vững toàn diện, bao gồm các giá trị xã hội và cấu trúc quản trị minh bạch.

Môi trường (E): Là trụ cột cốt lõi của mô hình cảng xanh, tập trung vào phi carbon hóa, kiểm soát ô nhiễm và tối ưu hóa năng lượng theo Tiêu chuẩn TCCS 02:2022/CHHVN [2, 11]. Đặc biệt, việc thực hiện kiểm kê khí nhà kính theo Quyết định 13/2024/QĐ-TTg đã chính thức chuyển đổi trách nhiệm quản lý môi trường tại các bến cảng từ hình thức tự nguyện sang bắt buộc [17].

Xã hội (S): Tập trung vào việc đảm bảo an toàn lao động, phúc lợi nhân viên và thúc đẩy mối quan hệ hài hòa với cộng đồng địa phương. Thực hành trách nhiệm xã hội tốt giúp nâng cao uy tín thương hiệu và gia tăng mức độ hài lòng của khách hàng trong chuỗi cung ứng [15, 16].

Quản trị (G): Đòi hỏi tính minh bạch trong công bố thông tin, đạo đức kinh doanh và cam kết dài hạn của ban lãnh đạo. Đây là nhân tố then chốt giúp doanh nghiệp cảng duy trì lợi thế cạnh tranh trước các áp lực thể chế và yêu cầu từ các định chế tài chính quốc tế [12, 13].

Nghiên cứu ứng dụng phương pháp Quy trình phân tích thứ bậc mờ (Fuzzy AHP) để giải quyết bài toán ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) trong thực thi ESG tại các bến cảng. Bằng cách sử dụng số mờ tam giác (TFNs), phương pháp này khắc phục sự mơ hồ và tính chủ quan của chuyên gia, cung cấp khung trọng số khoa học để tối ưu hóa nguồn lực đầu tư bền vững tại Hải Phòng. Trong khi xu hướng quốc tế tập trung lượng hóa hiệu quả bền vững qua mô hình toán học, tại Việt Nam, các nghiên cứu nhấn mạnh việc nội địa hóa tiêu chuẩn và tính toán chuẩn xác các "đầu ra không mong muốn" như phát thải. Dù có động lực từ vốn FDI, cụm cảng Hải Phòng vẫn đối mặt rào cản lớn về công nghệ và tài chính. Do đó, việc áp dụng MCDM là cấp thiết để hiện thực hóa lộ trình cảng biển xanh theo quy định nhà nước.

Bảng 1. Tổng hợp các phương pháp nghiên cứu phổ biến trong lĩnh vực cảng bền vững

Tác giả (Năm)	Khu vực	Phương pháp	Tiêu chí trọng tâm
Thai (2016) [16]	Singapore	SEM (Cấu trúc tuyến tính)	Chất lượng dịch vụ & Trách nhiệm xã hội
Nguyen et al. (2021) [7]	Việt Nam	DEA (SBM-Undesirable)	Hiệu quả kỹ thuật gắn liền với giảm phát thải
Le & Nguyen (2023) [6]	Hải Phòng	SEM (Cấu trúc tuyến tính)	Động lực và rào cản phát triển cảng xanh
Doan & Huynh (2024) [3]	Việt Nam	MCDA (Ra quyết định đa tiêu chí)	Xếp hạng ưu tiên các cảng container

3. QUY TRÌNH NGHIÊN CỨU

3.1. Quy trình nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng phương pháp luận hỗn hợp để xây dựng bộ chỉ số và lộ trình quản trị bền vững (ESG) cho cụm cảng container Hải Phòng qua ba giai đoạn: Chuẩn hóa bộ chỉ số bằng Delphi mờ, xác định trọng số ưu tiên qua phân tích thứ bậc (AHP) và thiết lập lộ trình hành động về hạ tầng, số hóa. Với sự tham vấn từ 25 chuyên gia đầu ngành, quy trình đảm bảo tính khoa học và thực tiễn, giúp cụ thể hóa các tiêu chuẩn cảng xanh nhằm nâng cao năng lực cạnh tranh bền vững cho hệ sinh thái cảng biển khu vực.

Bảng 2. Thành phần nhóm chuyên gia tham gia khảo sát

Nhóm chuyên gia	Số lượng	Thâm niên	Vị trí công tác
Quản lý cảng biển	10	15 năm	Giám đốc bến cảng, Trưởng phòng Kỹ thuật/ Khai thác
Cơ quan quản lý	5	15 năm	Cảng vụ Hàng hải Hải Phòng, Sở TN&MT
Học giả/Giảng viên	5	10 năm	Đại học Hàng hải Việt Nam, các viện nghiên cứu
Đại diện hãng tàu/ Logistics	5	10 năm	Trưởng đại diện các hãng tàu quốc tế tại Hải Phòng

3.2. Xây dựng bộ tiêu chí ESG đặc thù cho cụm cảng Hải Phòng thông qua Delphi mờ

Nghiên cứu thiết lập bộ tiêu chí ESG gồm 3 trụ cột và 9 tiêu chí thành phần, được hiệu chỉnh qua kỹ thuật Delphi mờ (FDM) để đảm bảo tính phù hợp với đặc thù bến cảng Hải Phòng. Quy trình sử dụng trí tuệ của 25 chuyên gia (Bảng 3) qua 2 vòng khảo sát độc lập nhằm hướng tới sự thống nhất cao nhất. Để lượng hóa sự mơ hồ, nghiên cứu sử dụng Số mờ tam giác (TFN) biểu diễn dưới dạng (a, b, c) tương ứng với các giá trị bi quan, khả năng nhất và lạc quan nhất. Tầm quan trọng được đánh giá qua thang đo ngôn ngữ 5 mức độ và tổng hợp bằng phương pháp Giá trị trung bình mờ (Fuzzy Mean):

$$a = \min(a_i) \quad b = \frac{1}{n}\sum b_i \quad c = \max(c_i) \tag{1}$$

Sự đồng thuận được xác lập khi tỷ lệ chuyên gia đạt ngưỡng chênh lệch $d \leq 0{,}2$ vượt quá 75%. Sau đó, số mờ được giải mờ bằng phương pháp trung tâm trọng lực để thu được giá trị thực S.

Nhóm Môi trường (E): Tập trung giảm thiểu tác động hệ sinh thái. Phát thải (C1) đo lường suất phát thải khí nhà kính theo Quyết định 13/2024/QĐ-TTg [17]. Năng lượng (C2) đánh giá tỷ lệ thiết bị điện và điện bờ theo Quyết định 2027/QĐ-BGTVT [1]. Rác thải (C3) kiểm soát ô nhiễm nước và chất thải theo TCCS 02:2022/CHHVN [2].

Nhóm Xã hội (S): Nhấn mạnh yếu tố con người. An toàn (C4) duy trì tiêu chuẩn sức khỏe nghề nghiệp [15]. Nhân sự (C5) đo lường đào tạo bền vững theo lý thuyết GHRM [5]. Cộng đồng (C6) xác định mức độ hài lòng của địa phương thông qua báo cáo CSR hoặc ĐTM [16, 6].

Nhóm Quản trị (G): Đóng vai trò định hướng chiến lược. Minh bạch (C7) tham chiếu tiêu chuẩn báo cáo GRI [20]. Lãnh đạo (C8) đánh giá cam kết nguồn lực cho sáng kiến xanh [12]. Số hóa (C9) lượng hóa tỷ lệ tự động hóa quy trình nghiệp vụ thông qua hệ thống TOS [4].

Bảng 3. Danh mục các chỉ số ESG tiêu biểu

Trụ cột	Tiêu chí	Ký hiệu	Chỉ số đo lường tiêu biểu	Căn cứ dẫn chiếu
Môi trường	Phát thải	C1	Suất phát thải khí nhà kính/TEU (kgCO2e/TEU)	QĐ 13/2024 [17]
	Năng lượng	C2	Tỷ lệ thiết bị chạy điện/ tổng thiết bị (%)	QĐ 2027/BGTVT [1]
	Rác thải	C3	Tỷ lệ rác thải được xử lý đúng quy định (%)	TCCS 02:2022 [2]

Xã hội	An toàn	C4	Số vụ tai nạn lao động nghiêm trọng (Vụ/năm)	Thai (2008) [15]
	Nhân sự	C5	Số giờ đào tạo ESG/nhân viên/năm (Giờ/người)	Jabbour (2016) [5]
	Cộng đồng	C6	Chỉ số hài lòng của dân cư và địa phương (%)	Le & Nguyen (2023) [6]
Quản trị	Minh bạch	C7	Mức độ áp dụng tiêu chuẩn báo cáo GRI (%)	Chuẩn GRI (2021) [20]
	Lãnh đạo	C8	Tỷ lệ ngân sách dành cho sáng kiến xanh (%)	Saeed et al. (2018) [12]
	Số hóa	C9	Mức độ tự động hóa quy trình nghiệp vụ (%)	Fei et al. (2024) [4]

3.3. Xây dựng mô hình fuzzy AHP

Quy trình phân tích thứ bậc mờ (Fuzzy AHP) được sử dụng để xác định trọng số ưu tiên của các tiêu chí ESG, giúp khắc phục tính chủ quan và sự mơ hồ trong nhận thức của con người khi đánh giá. Thay vì sử dụng số thực sắc nét, phương pháp này áp dụng lý thuyết tập mờ với quy trình toán học cụ thể như sau:

* Bước 1: Định nghĩa số mờ tam giác (Triangular Fuzzy Numbers - TFN) Nghiên cứu sử dụng số mờ tam giác (TFN) để lượng hóa các đánh giá ngôn ngữ của chuyên gia. Một số mờ tam giác được biểu diễn dưới dạng $\tilde{A} = (l, m, u)$. Trong đó:

- l: Giá trị đánh giá bi quan nhất (cận dưới);
- m: Giá trị khả năng nhất (trung tâm);
- u: Giá trị lạc quan nhất (cận trên).

Để đánh giá mức độ quan trọng giữa các tiêu chí, các chuyên gia sử dụng thang đo ngôn ngữ tương ứng với số mờ (Ví dụ: Cân bằng: (1, 1, 1); Hơi quan trọng: (2, 3, 4); Quan trọng: (4, 5, 6); Rất quan trọng: (6, 7, 8); Tuyệt đối quan trọng: (9, 9, 9)).

* Bước 2: Xây dựng Ma trận so sánh cặp mờ (Fuzzy Pairwise Comparison Matrix) cho hội đồng gồm 25 chuyên gia đánh giá tiêu chí. Chuyên gia thứ k so sánh mức độ quan trọng của tiêu chí i với tiêu chí j, tạo ra số mờ $\tilde{a}_{ij}^k = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, u_{ij}^k)$. Tổng hợp ý kiến của chuyên gia để tạo thành một ma trận so sánh cặp mờ đại diện $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}]_{n\times n}$. Phần tử $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ được tính bằng phương pháp trung bình nhân (Geometric Mean):

$$\begin{aligned} l_{ij} &= (l_{ij}^1 \times l_{ij}^2 \times \ldots \times l_{ij}^K)^{1/K} \\ m_{ij} &= (m_{ij}^1 \times m_{ij}^2 \times \ldots \times m_{ij}^K)^{1/K} \\ u_{ij} &= (u_{ij}^1 \times u_{ij}^2 \times \ldots \times u_{ij}^K)^{1/K} \end{aligned} \quad (2)$$

Ma trận thu được có tính chất nghịch đảo:

$$\tilde{a}_{ji} = \tilde{a}_{ij}^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}}\right) \quad (3)$$

* Bước 3: Tính toán trọng số mờ (Fuzzy Weights): Nghiên cứu áp dụng phương pháp của Buckley để tính trọng số mờ cục bộ cho từng tiêu chí. Trước tiên, tính giá trị trung bình nhân mờ $\tilde{r}_i$ của từng hàng i trong ma trận:

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \ldots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (4)$$

(Với $\otimes$ là phép nhân hai số mờ:
$(l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) \approx (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2))$

Tiếp theo, tính trọng số mờ $\tilde{w}_i = (l_{wi}, m_{wi}, u_{wi})$ của tiêu chí i bằng công thức: $\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \ldots \oplus \tilde{r}_n)^{-1}$

* Bước 4: Giải mờ (Defuzzification) và chuẩn hóa trọng số. Để sắp xếp thứ tự ưu tiên, trọng số mờ $\tilde{w}_i$ cần được chuyển đổi thành một giá trị thực (crisp value). Nghiên cứu áp dụng phương pháp giải mờ Trung tâm trọng lực (Center of Gravity) theo công thức:

$$W_i = \frac{l_{wi} + m_{wi} + u_{wi}}{3} \quad (5)$$

Sau đó, tiến hành chuẩn hóa để tổng trọng số của tất cả các tiêu chí bằng 1:

$$W_i^* = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \quad (6)$$

Giá trị W_i^* chính là trọng số ưu tiên cuối cùng của tiêu chí i .

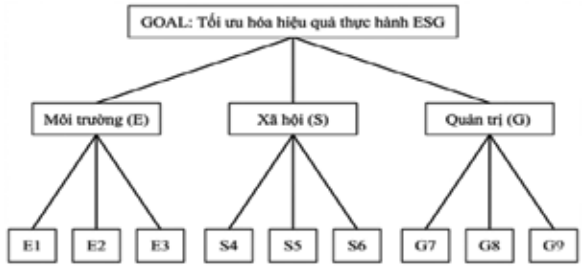
* Bước 5: Kiểm tra tỷ số nhất quán (Consistency Check). Mặc dù là ma trận mờ, quá trình so sánh cặp vẫn phải đảm bảo tính logic. Để kiểm tra, giải mờ ma trận Ã ban đầu thành ma trận số thực A = $[a_{ij}]$ với $a_{ij} = (l_{ij} + m_{ij} + u_{ij})/3$. Từ ma trận A, tìm giá trị riêng lớn nhất λ_{max} và tính chỉ số nhất quán (CI) cùng tỷ số nhất quán (CR):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

Trong đó: RI là chỉ số ngẫu nhiên tương ứng với cấp ma trận .

Điều kiện bắt buộc là CR ≤ 0,1. Nếu CR > 0,1, quy trình khảo sát phải được thực hiện lại để điều chỉnh sự mâu thuẫn trong đánh giá của chuyên gia.



Hình 1. Sơ đồ mạng lưới tối ưu hiệu quả thực hành ESG

Mô hình tính toán trên được áp dụng cho sơ đồ mạng lưới AHP như thể hiện ở Hình 1.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả đánh giá trọng số bằng mô hình Fuzzy AHP

Dựa trên kết quả khảo sát từ 25 chuyên gia thông qua ma trận so sánh cặp mờ, nghiên cứu tiến hành tính toán trọng số cho 3 trụ cột chính (Môi trường, Xã hội, Quản trị) và 9 tiêu chí thành phần.

Bảng 4. Ma trận so sánh cặp mờ (Fuzzy Pairwise Comparison Matrix) cấp 1

Trụ cột	Môi trường (E)	Xã hội (S)	Quản trị (G)
Môi trường (E)	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)
Xã hội (S)	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1)
Quản trị (G)	(1/3, 1/2, 1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)

Áp dụng phương pháp của Buckley để tính trung bình nhân mờ và giải mờ bằng phương pháp Trung tâm trọng lực, ta thu được trọng số thực và trọng số chuẩn hóa của các trụ cột.

Bảng 5. Trọng số mờ và trọng số thực chuẩn hóa của các trụ cột ESG

Trụ cột	Trọng số mờ (Fuzzy Weights - wi)	Trọng số thực (Crisp Weight - Wi)	Trọng số chuẩn hóa (Wi*)	Xếp hạng
Môi trường (E)	(0,35, 0,50, 0,65)	0,500	0,510	1
Xã hội (S)	(0,10, 0,15, 0,30)	0,183	0,187	3
Quản trị (G)	(0,15, 0,30, 0,45)	0,300	0,303	2

Kiểm tra tính nhất quán (CR): Ma trận đạt tỷ số CR = 0,045 < 0,1, đảm bảo tính hợp lệ của dữ liệu chuyên gia. Tiếp tục quy trình tương tự cho các tiêu chí cấp 2, nghiên cứu tổng hợp trọng số toàn cục (Global Weight = Trọng số trụ cột × Trọng số tiêu chí thành phần)

để xác định mức độ ưu tiên tổng thể đối với cụm cảng Hải Phòng.

Bảng 6. Tổng hợp kết quả trọng số toàn cục và xếp hạng ưu tiên các tiêu chí ESG

Trụ cột (Trọng số)	Tiêu chí thành phần	Trọng số cục bộ (Local)	Trọng số toàn cục (Global)	Xếp hạng ưu tiên
Môi trường (0,510)	Phát thải (C1)	0,550	0,280	1
	Năng lượng (C2)	0,250	0,128	3
	Rác thải (C3)	0,200	0,102	4
Xã hội (0,187)	An toàn (C4)	0,450	0,084	5
	Nhân sự (C5)	0,300	0,056	7
	Cộng đồng (C6)	0,250	0,047	9
Quản trị (0,303)	Minh bạch (C7)	0,200	0,061	6
	Lãnh đạo (C8)	0,450	0,136	2
	Số hóa (C9)	0,350	0,106	4

4.2. Thảo luận và đề xuất lộ trình ưu tiên

Từ kết quả phân tích Fuzzy AHP (giả định), Môi trường (0,510) là trụ cột được hội đồng chuyên gia đánh giá có mức độ quan trọng cao nhất, theo sát là Quản trị (0,303). Kết quả này phản ánh đúng áp lực tuân thủ kiểm kê khí nhà kính nội địa theo Quyết định 13/2024/QĐ-TTg đang đặt lên vai các bến cảng. Căn cứ vào bảng xếp hạng trọng số toàn cục, lộ trình ưu tiên thực hành ESG tại cụm cảng container Hải Phòng cần tập trung vào các nhóm hành động sau:

Ưu tiên ngắn hạn (1 - 2 năm tới) - Quản trị phát thải (C1) và Cam kết nguồn lực (C8): Tiêu chí *Phát thải (C1)* chiếm trọng số cao nhất (0,280), đòi hỏi các bến cảng, từ khu vực Lạch Huyện đến hệ thống cảng sông Đình Vũ phải khẩn trương hoàn thiện hệ thống đo lường suất phát thải khí nhà kính/TEU. Tuy nhiên, rào cản về công nghệ và vốn tại Hải Phòng vẫn là thách thức lớn. Do đó, tiêu chí *Lãnh đạo (C8)* xếp thứ 2 cho thấy vai trò sống còn của ban lãnh đạo trong việc quyết định phân bổ tỷ lệ ngân sách dành cho các sáng kiến xanh.

Ưu tiên trung hạn (đến 2030) - Chuyển đổi năng lượng (C2) và Số hóa (C9): Việc gia tăng tỷ lệ thiết bị chạy điện và điện bờ (Shore power) theo Quyết định 2027/BGTVT cần được thực hiện đồng bộ với mức độ tự động hóa quy trình nghiệp vụ (C9). Chuyển dịch từ quản lý bán tự động sang số hóa và IoT không chỉ giúp tối ưu hóa vận hành mà còn tạo ra giá trị niềm tin xanh để đáp ứng tiêu chuẩn báo cáo bền vững từ các hãng tàu quốc tế.

Ưu tiên dài hạn - Tích hợp yếu tố Xã hội: Dù có trọng số thấp hơn trong bối cảnh hiện tại, các yếu tố về *An toàn (C4)* và *Nhân sự (C5)* vẫn là nền tảng để duy trì hoạt động. Đào tạo nhân sự về ESG và duy trì quan hệ hài hòa với cộng đồng sẽ củng cố lợi thế cạnh tranh dài hạn của toàn bộ hệ sinh thái cảng biển Hải Phòng trên bản đồ hàng hải quốc tế.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công mô hình lai giữa Delphi mờ và Fuzzy AHP để giải quyết bài toán ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) phức tạp trong thực thi ESG tại cụm cảng Hải Phòng. Việc chuyển đổi đánh giá định tính, có tính mơ hồ của chuyên gia thành các chỉ số ưu tiên đã chỉ ra rằng, giảm thiểu phát thải và cam kết nguồn lực từ ban lãnh đạo là hai yếu tố then chốt nhất ở giai đoạn này. Lộ trình được đề xuất không chỉ hỗ trợ các nhà quản lý tối ưu hóa dòng vốn đầu tư, mà còn giúp cụm cảng tuân thủ các quy định pháp lý quốc gia (Quyết định 13, Quyết định 2027) và tránh bị tụt hậu trong chuỗi cung ứng xanh toàn cầu. Hạn chế của nghiên cứu là dữ liệu khảo sát chủ yếu gói gọn trong hệ thống cảng Hải Phòng, các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng mô hình ứng dụng cho toàn bộ hệ thống cảng biển Việt Nam.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số: DT25-26.133.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Giao thông Vận tải. Quyết định số 2027/QĐ-BGTVT về việc phê duyệt Đề án phát triển cảng xanh tại Việt Nam, 2020.

[2] Cục Hàng hải Việt Nam. Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 02:2022/CHHVN về Tiêu chí cảng xanh Việt Nam, 2022.

[3] Q. M. Doan and N. T. Huynh. Assessing green port performance by multiple-criteria decision analysis. Grenze Int. J. Eng. Technol., 2024.

[4] H. Fei, H. Shi, and X. Pan. A systematic review of green port evaluation: Methods, subjects and indicators. J. Mar. Sci. Eng., vol. 13, no. 6, 2024, doi: 10.3390/jmse13030604.

[5] C. J. C. Jabbour and A. B. L. S. Jabbour. Green human resource management and green supply chain management: Linking two emerging agendas. J. Clean. Prod., vol. 112, pp. 1824-1833, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.052.

[6] S. T. Le and T. H. Nguyen. The development of green ports in emerging nations: A case study of Vietnam. Sustainability, vol. 15, no. 18, p. 13502, 2023, doi: 10.3390/su151813502.

[7] T. L. H. Nguyen, S. H. Park, Y. Kim, and G. T. Yeo. An efficiency analysis of container terminals in Southern Vietnam using DEA dynamic efficiency evaluation. Asian J. Shipp. Logist., vol. 37, no. 4, pp. 329-336, 2021, doi: 10.1016/j.ajsl.2021.09.003.

[8] T. Notteboom, T. Pallis and J. P. Rodrigue. Disruptions and resilience in global container shipping and ports: The COVID-19 pandemic versus the 2008-2009 financial crisis. Marit. Econ. Logist., vol. 23, pp. 179-210, 2021, doi: 10.1057/s41278-020-00180-5.

[9] S. Opricovic. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. Expert Syst. Appl., vol. 38, no. 10, pp. 12983-12990, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.097.

[10] S. Opricovic and G. H. Tzeng. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. Eur. J. Oper. Res., vol. 156, no. 2, pp. 445-455, 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.

[11] H. N. Psaraftis. Decarbonization of maritime transport: To be or not to be?. Marit. Econ. Logist., vol. 21, pp. 353-371, 2018, doi: 10.1057/s41278-018-0098-8.

[12] A. Saeed and Y. Jun. Institutional pressures, green supply chain management practices on environmental and economic performance: A two theory view. Sustainability, vol. 10, no. 5, p. 1517, 2018, doi: 10.3390/su10051517.

[13] J. Sarkis. A strategic decision framework for green supply chain management. J. Clean. Prod., vol. 11, no. 4, pp. 397-409, 2003, doi: 10.1016/S0959-6526(02)00062-8.

[14] S. Tadić, S. Zečević and M. Krstić. A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy VIKOR for city logistics concept selection. Expert Syst. Appl., vol. 41, no. 18, pp. 8112-8128, 2014, doi: 10.1016/j.eswa.2014.07.021.

[15] V. V. Thai. Service quality in maritime transport: Conceptual model and empirical evidence. Asia Pac. J. Mark. Logist., vol. 20, no. 4, pp. 493-518, 2008, doi: 10.1108/13555850810909777.

[16] V. V. Thai. The impact of port service quality on customer satisfaction: The case of Singapore. Marit. Econ. Logist., vol. 18, no. 4, pp. 458-475, 2016, doi: 10.1057/mel.2015.19.

[17] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 13/2024/QĐ-TTg ban hành danh mục lĩnh vực, cơ sở phát thải khí nhà kính phải thực hiện kiểm kê khí nhà kính. 2024.

[18] K. F. Yuen, X. Wang, Y. D. Wong, and Q. Zhou. The effect of sustainable shipping practices on shippers' loyalty: The mediating role of perceived value, trust and transaction cost. Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev., vol. 116, pp. 123-135, 2018, doi: 10.1016/j.tre.2018.06.002.

[19] T. L. Saaty and L. G. Vargas. Decision making with the analytic network process: Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks. Springer, 2006, doi: 10.1007/0-387-33987-6.

[20] Global Reporting Initiative. GRI Standards. Global Reporting Initiative, 2021. Internet: https://www.globalreporting.org/standards/.

■Ngày nhận bài: 02/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 21/4/2026

Nghiên cứu hiện trạng, biến động môi trường nước khu vực nuôi lồng bè ven biển Hải Phòng

Study on the status and fluctuations of water environment in cage aquaculture in Hai Phong coastal

> TS TRẦN HỮU LONG[1,*], THS LƯU NGỌC THIỆN[2]
[1]Viện Môi trường, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Viện Nghiên cứu Hải Sản
[*]Email: longth.mt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Quan trắc chất lượng môi trường nước ở khu vực nuôi cá lồng bè ven biển Hải Phòng để đảm bảo và duy trì chất lượng nước trong giá trị giới hạn (GTGH) bằng cách khảo sát, đo đạc trực tiếp các thông số hiện trường (độ sâu, độ trong, độ đục, nhiệt độ, pH, độ mặn, nồng độ oxy hòa tan) bằng các máy móc chuyên dụng (Handy lab 680, WTW Turb 355 IR) và các thông số (nitrat, amoni, photphat, tổng chất rắn lơ lửng, nhu cầu oxy hóa học) phân tích trong phòng thí nghiệm dựa theo Tiêu chuẩn SMEWW 4500-NO_2. B:2017, SMEWW 5520B:2017, Quy trình US EPA 200.8. Các kết quả dựa trên Quy chuẩn QCVN 10-MT:2023/BTNMT, tiêu chuẩn Asean để xác định GTGH của các thông số. Trong nghiên cứu, các thông số đều có biểu hiện ô nhiễm dinh dưỡng. Tuy nhiên, mức độ ô nhiễm ở mỗi vùng nuôi cũng rất khác nhau, thậm chí cục bộ khác nhau giữa những khu vực nuôi trong cùng vùng nuôi.

Từ khóa: Nuôi cá lồng bè; chất lượng nước nuôi trồng; thủy sản ven biển.

ABSTRACT

Water quality monitoring in cage aquaculture in Hai Phong coastal is essential to ensure and maintain water quality within allowable limits. This study involved direct field surveys and measurements of parameters (depth, transparency, turbidity, temperature, pH, salinity and dissolved oxygen) using specialized equipment (Handy Lab 680, WTW Turb 355 IR). Additionally, laboratory analyses for nitrate, ammonium, phosphate, total suspended solids (TSS), and chemical oxygen demand (COD) were conducted following SMEWW 4500-NO_2 B:2017, SMEWW 5520B:2017 and US EPA 200.8 procedures. Results were evaluated against the QCVN 10:2023/BTNMT national technical regulation and ASEAN standards to determine the threshold limits for each parameter. The study indicates that all parameters show signs of nutrient pollution; however, pollution levels vary significantly between farming areas and even exhibit localized differences within the same region.

Keywords: Cage aquaculture; aquaculture water quality; coastal fisheries.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hải Phòng có những điều kiện thuận lợi về điều kiện tự nhiên, môi trường phù hợp với sự phát triển nuôi trồng thủy sản vùng ven bờ. Nghề nuôi lồng bè ven biển của Hải Phòng tập trung tại hai khu vực chính là Cát Hải và Cát Bà, chất lượng môi trường nước ven biển tương đối ổn định nhưng hiện nay nuôi trồng thủy sản đang gây áp lực đến chất lượng môi trường nước, tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm rất cao. Giải pháp để duy trì và thúc đẩy phát triển kinh tế thủy sản là đảm bảo chất lượng nước tại các khu lồng bè của vật nuôi, nghiên cứu này là bước đầu trong kiểm soát chất lượng nước bao gồm: Nhiệt độ, pH, độ sâu, độ trong, độ mặn, nồng độ oxy hòa tan, độ đục, tổng chất rắn lơ lửng (TSS), dinh dưỡng (N-NO_2^-, N-NH_4^+, P-PO_4^{3-}), nhu cầu oxy hóa học (COD_{Mn}), hàm lượng dầu, mỡ khoáng, hàm lượng kim loại nặng (Cd, Pb).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thu mẫu và bảo quản mẫu

Dựa trên Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) TCVN 6663-3:2016 (ISO 5667-3:2012), nhóm nghiên cứu đã sử dụng dụng cụ Niskin Vandorn Sampler loại 5 lít để lấy mẫu nước tại 4 vị trí bè nuôi cố định. Tần suất lấy mẫu là 1 lần/tháng, kéo dài từ tháng 4 đến tháng 8. Các mẫu nước được thu thập tại hai tầng nước (mặt và đáy) với tọa độ cụ thể như sau:

- Khu vực Hang Vẹm - Vụng O: CB1 (107°3'35.41"E, 20°44'18.25"N) và CB2 (107°3'44.16"E, 20°44'17.49"N).
- Khu vực hòn Thoi Quýt - Gia Luận: CB3 (106°58'48.13"E, 20°51'48.48"N) và CB4 (106°58'59.23"E, 20°51'46.32"N).

Bảo quản mẫu: Các chỉ tiêu muối dinh dưỡng (N-NO_2^-, N-NH_4^+, P-PO_4^{3-}) được bảo quản ở nhiệt độ 4°C. Đối với T-N, T-P, COD và dầu

mỡ khoáng, mẫu được axit hóa bằng bằng axit H_2SO_4 pH=2 trước khi vận chuyển về phòng thí nghiệm theo Tiêu chuẩn SMEWW 4500-P.E:2017 [1].

2.2. Phương pháp phân tích

** Phân tích bằng phương pháp lý - hóa:*

- TSS: Xác định bằng phương pháp lọc hút chân không (mẫu 1.000 ml) qua giấy lọc sợi thủy tinh, rửa loại muối, sấy ở 105°C đến khối lượng không đổi và cân [2].

- COD: Oxy hóa bằng $KMnO_4$ trong môi trường kiềm ở 105°C, sau đó chuẩn độ lượng dư bằng dung dịch $Na_2S_2O_3$ 0,02N với chỉ thị hồ tinh bột [3].

- Dầu mỡ: Chiết lỏng-lỏng từ 3 lít nước biển bằng n-hexan, làm sạch qua Na_2SO_4, sau đó cô bay hơi dung môi và sấy đến khối lượng không đổi ở 82°C.

** Phân tích bằng quang phổ (DREL 6000):*

- Nitrit và Orthophotphat: Đo màu trực tiếp tại bước sóng tương ứng là 543 nm ($N\text{-}NO_2^-$) và 880 nm ($P\text{-}PO_4^{3-}$).

- Amoni: Chưng cất 100 ml mẫu trong môi trường kiềm đặc, hấp thụ bằng axit H_2SO_4 0,02N, sau đó tạo màu với thuốc thử Nessler và đo tại bước sóng 420 nm.

** Phân tích kim loại nặng:* Các nguyên tố Cd, Pb, Hg được xác định trên hệ thống ICP-MS NEXION 2.000 B theo tiêu chuẩn US EPA 200.8. Mẫu được lọc qua màng 0,45 µm và pha loãng trong dung dịch axit HNO_3 2% trước khi đo trực tiếp.

2.3. Đánh giá chất lượng nước và rủi ro môi trường

Công tác đánh giá chất lượng môi trường nước tại khu vực nuôi trồng được thực hiện dựa trên việc so sánh kết quả quan trắc với GTGH quy định tại QCVN 10-MT:2023/BTNMT [4] và các tiêu chuẩn khuyến nghị từ Asean [5]. Song song với đó, mức độ rủi ro ô nhiễm môi trường biển được xác định theo quy trình tại Thông tư số 26/2016/TT-BTNMT [6], dựa trên tiêu chuẩn hiện hành.

Chỉ số rủi ro (RQ) được tính toán thông qua công thức sau:

$$RQ = \frac{\sum_{j=1}^{m} W_j \left(\frac{MEC}{PNEC}\right)_j}{\sum_{j=1}^{m} W_j}$$

Trong đó:

RQ: Chỉ số rủi ro ô nhiễm môi trường (xếp loại theo thang phân cấp).

MEC: Nồng độ thực tế của chất gây ô nhiễm *j* trong môi trường.

PNEC: Ngưỡng nồng độ giới hạn cho phép của thông số j.

M: Tổng số thông số ô nhiễm được đưa vào đánh giá.

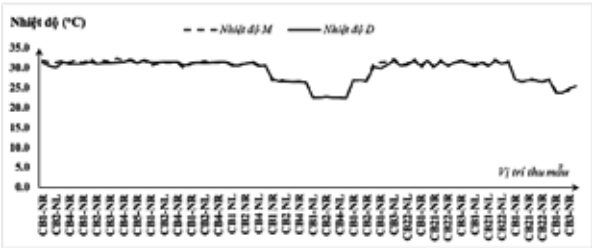
Wj: Trọng số tương ứng của thông số rủi ro j.

3. KẾT QUẢ

3.1. Hiện trạng, biến động thông số môi trường nền cơ bản

3.1.1. Nhiệt độ nước

Nhiệt độ nước dao động từ 21,4 - 32°C (trung bình 28,6°C), biến thiên đồng nhất với nhiệt độ không khí và nằm trong ngưỡng sinh trưởng tối ưu của cá biển nhiệt đới. Chênh lệch giữa hai tầng nước (tầng mặt, tầng đáy) thường thấp (0,1 - 0,9°C), nhưng có thể đạt mức cục bộ (1,6 - 1,9°C) vào cao điểm nắng nóng tháng 7.



Hình 1. Biến đổi nhiệt độ nước biển tầng mặt, tầng đáy

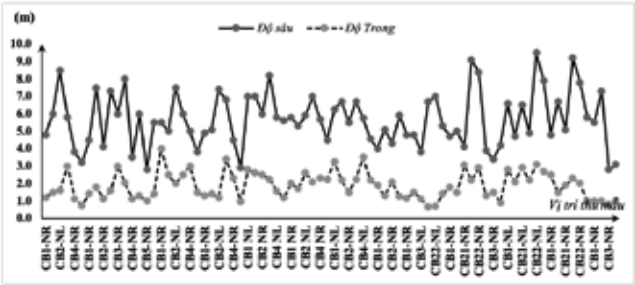
3.1.2. Trị số pH

Giá trị pH dao động từ 7,92 đến 8,29, mang tính trung tính hoặc kiềm yếu. Chỉ số này tương đối ổn định và nằm trong ngưỡng phù hợp cho môi trường nuôi trồng thủy sản.

3.1.3. Độ sâu, độ trong

- Độ sâu: Dao động từ 2,8 - 9,1m, phụ thuộc vào địa hình và thủy triều (biên độ triều lớn, từ 1,6 đến > 3 m). Khu vực CB1, CB2 có độ sâu lớn hơn CB3, CB4.

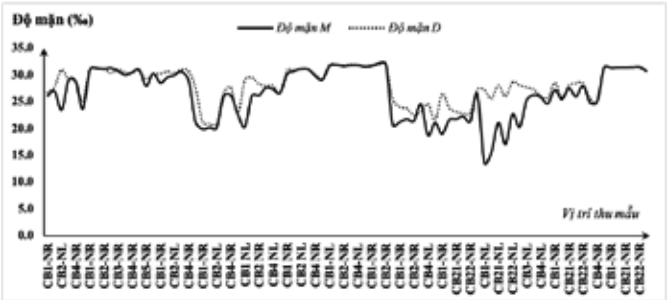
- Độ trong: Dao động từ 0,6 - 3,5 m. Độ trong thấp nhất vào mùa mưa do ảnh hưởng từ đất liền. Khu vực CB3, CB4 đục hơn khu vực CB1, CB2 do đặc thù địa hình và tốc độ dòng chảy.



Hình 2. Biến đổi độ sâu, độ trong

3.1.4. Độ mặn

Độ mặn biến thiên mạnh từ 13,6 đến 32,48‰ (trung bình 26,38‰). Vào mùa mưa (tháng 6 - 8), độ mặn tầng mặt giảm sâu (< 20‰) tạo sự phân tầng rõ rệt so với tầng đáy (chênh lệch từ 0,1 đến 13,5‰). Theo thủy triều, độ mặn khi nước lớn thường cao hơn khi nước ròng.

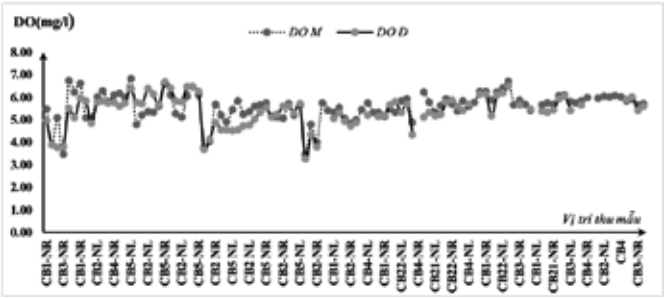


Hình 3. Biến đổi độ mặn nước biển tầng mặt, tầng đáy

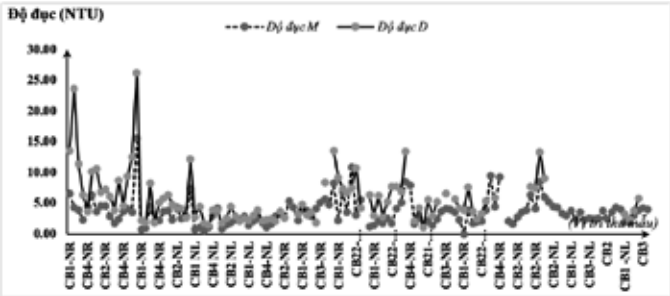
3.1.5. Nồng độ oxy hòa tan trong nước (DO) và độ đục

- Oxy hòa tan (DO): Dao động 3,5 - 6,25 mg/l (trung bình 5,64 mg/l). Nhìn chung, nồng độ DO đảm bảo > 4 mg/l, chỉ giảm cục bộ xuống dưới ngưỡng này vào sáng sớm hoặc khi nắng nóng. Tầng mặt có lượng oxy cao hơn tầng đáy (chênh lệch 0,1 - 1,3 mg/l).

- Độ đục: Dao động 1,16 - 10,89 NTU (trung bình 4 NTU). Độ đục tăng cao rõ rệt vào mùa mưa (tháng 7) và thường ghi nhận giá trị ở tầng đáy cao hơn tầng mặt



Hình 4. Biến đổi nồng độ oxy hòa tan

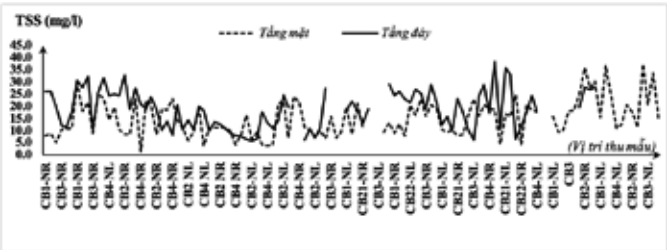


Hình 5. Biến đổi độ đục trong nước biển

3.2. Hiện trạng, biến động thông số dinh dưỡng, chất hữu cơ

3.2.1. Tổng chất rắn lơ lửng (TSS)

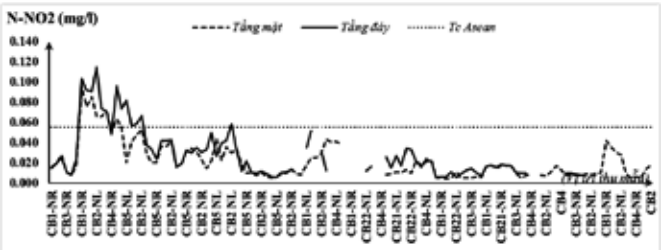
Dao động 7,2 - 37,2 mg/l (TB 18,45 mg/l), nằm trong giới hạn cho phép của QCVN 10:2023 (< 50mg/l). Sự khác biệt giữa các tầng nước không đáng kể do dòng chảy xáo trộn mạnh.



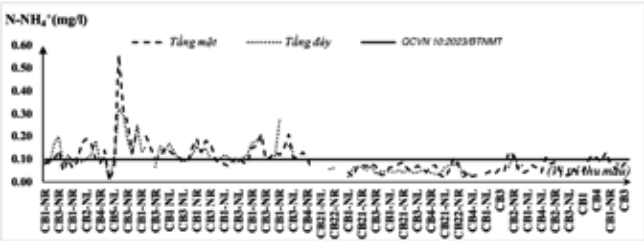
Hình 6. Biến đổi hàm lượng tổng chất rắn lơ lửng

3.2.2. Muối dinh dưỡng N-NO_2^-, N-NH_4^+, P-PO_4^{3-}

- N-NO_2^- và N-NH_4^+: Hàm lượng N-NO_2^- đạt chuẩn (TB 0,015 mg/l) và đang giảm dần nhờ quy hoạch lại lồng bè. N-NH_4^+ dao động 0,024 - 0,21 mg/l, đa số đạt chuẩn nhưng vẫn vượt ngưỡng cục bộ tại một số bè nuôi.

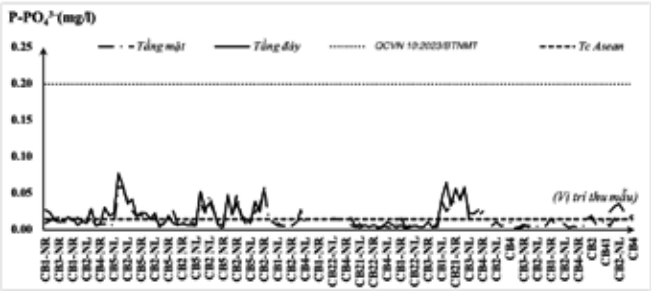


Hình 7. Biến đổi hàm lượng muối dinh dưỡng N-NO2-



Hình 8. Biến đổi hàm lượng muối dinh dưỡng N-NH4+ - P-PO43-

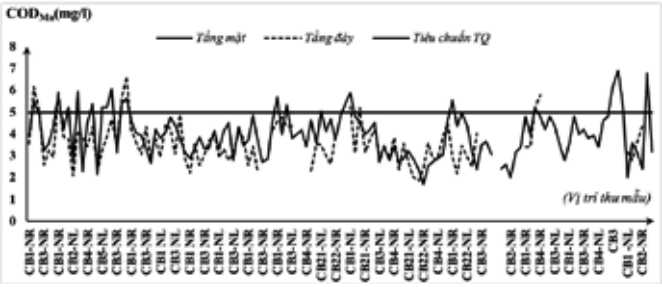
Trung bình 0,011 mg/l. Dù đạt chuẩn Việt Nam nhưng so với chuẩn ASEAN, nhiều mẫu vượt từ 2,22 - 4,38 lần, tiềm ẩn nguy cơ tảo nở hoa.



Hình 9. Biến đổi hàm lượng muối dinh dưỡng P-PO43-

3.2.3. Nhu cầu oxy hóa hóa học (COD_{Mn})

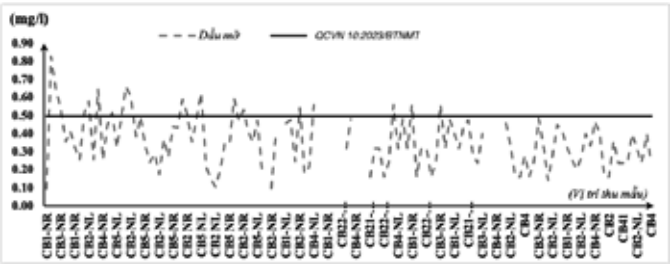
Dao động 2 - 6,91 mg/l (TB 4,05 mg/l), phần lớn mẫu nằm trong ngưỡng an toàn (< 5 mg/l) theo tiêu chuẩn bảo tồn.



Hình 10. Biến đổi hàm lượng CODMn

3.2.4. Hàm lượng dầu, mỡ khóang

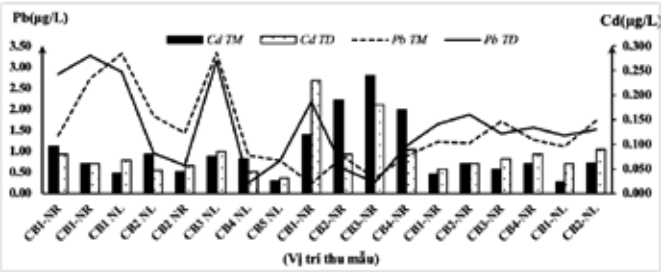
Dao động 0,1 - 0,56 mg/l (TB 0,32 mg/l). Hầu hết các vị trí đều vượt ngưỡng ASEAN (0,14 mg/l), chỉ số này có xu hướng giảm dần và thường chỉ tồn tại cục bộ.



Hình 11. Biến động thành phần dầu, mỡ khoáng

3.3. Hiện trạng, biến động hàm lượng kim loại nặng (Cd, Pb)

Dù các nguồn thải công nghiệp chưa phổ biến tại vùng nuôi, việc giám sát kim loại nặng vẫn được duy trì để đảm bảo an toàn thực phẩm. Kết quả cho thấy hàm lượng các nguyên tố đều ở mức rất thấp: Hg dưới ngưỡng phát hiện (< 0,1µg/L), Cd (0,02 - 0,24 µg/L) và Pb (0,25 - 3,27µ g/L). Đối chiếu với QCVN 10:2023/BTNMT, các chỉ số này hoàn toàn nằm trong ngưỡng an toàn cho nuôi trồng và bảo tồn thủy sinh.



Hình 12. Biến động thành phần Cd,Pb

4. THẢO LUẬN

Nghiên cứu cho thấy môi trường nước đang bị ô nhiễm dinh dưỡng cục bộ, có sự phân hóa rõ rệt giữa các khu vực. Đáng chú ý, nồng độ các chất ô nhiễm vào mùa mưa cao hơn mùa khô do lượng mưa lớn cuốn theo chất thải từ đất liền.

- Vượt ngưỡng: Nồng độ N-NH_4^+ vượt GTGH tại nhiều điểm; P-PO_4^{3-} vượt chuẩn ASEAN; COD cao (một số nơi vượt chuẩn Trung Quốc); DO thấp cục bộ.

- Nguy cơ sinh học: Sự gia tăng chất lơ lửng và dinh dưỡng, kết hợp với tảo độc và vi khuẩn hại (Vibrio, Coliform), tiềm ẩn rủi ro gây hiện tượng tảo nở hoa và dịch bệnh trên cá.

- Đánh giá rủi ro: Chỉ số rủi ro (RQ) phổ biến ở mức Thấp đến Trung bình, riêng trạm CB2 ghi nhận mức Cao.

Bảng 1. Giá trị RQ tại các điểm thu mẫu

Điểm thu mẫu	Giá trị	RQ	Đánh giá
CB1	Thấp nhất	0,45	Rủi ro ô nhiễm nước biển từ thấp đến trung bình
	Cao nhất	1,09	
	Trung bình	0,73	
CB2	Thấp nhất	0,37	Rủi ro ô nhiễm nước biển từ thấp đến cao
	Cao nhất	2,19	
	Trung bình	0,87	
CB3	Thấp nhất	0,46	Rủi ro ô nhiễm nước biển từ thấp đến trung bình
	Cao nhất	1,18	
	Trung bình	0,72	
CB4	Thấp nhất	0,46	Rủi ro ô nhiễm nước biển từ thấp đến trung bình

5. KẾT LUẬN

Mặc dù sở hữu các lợi thế về tự nhiên và hải văn, vùng nuôi biển Hải Phòng đang đối mặt với xu hướng ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng. Trong đó, khu vực Hang Vẹm - Vụng O ghi nhận mức độ ô nhiễm báo động với hàm lượng N-NH_4^+ và COD vượt nhiều lần giới hạn cho phép (QCVN 10:2023/BTNMT và ASEAN), đi kèm tình trạng thiếu hụt DO thường xuyên. Ngược lại, khu vực hòn Thoi Quýt duy trì chất lượng nước ổn định hơn. Nhìn chung, rủi ro ô nhiễm tại các vùng nuôi dao động từ mức Thấp đến Trung bình, đòi hỏi công tác giám sát môi trường phải được thực hiện định kỳ và chặt chẽ hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thông tư số 26/2016/TT-BTNMT. Bộ Tài nguyên và Môi trường Quy định chi tiết tiêu chí phân cấp vùng rủi ro ô nhiễm môi trường biển và hải đảo và hướng dẫn phân vùng rủi ro ô nhiễm môi trường biển và hải đảo, Hà Nội, 2016.

[2] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Quy chuẩn Kỹ thuật Quốc gia về Chất lượng nước biển. QCVN 10:2023/BTNMT, 2023.

[3] Đoàn Bộ. Các phương pháp phân tích hóa học nước biển. NXB. Đại học Quốc gia Hà Nội, 2001.

[4] Nguyễn Đình Đáp. Đánh giá hiện trạng môi trường nước khu vực nuôi trồng thủy sản lồng bè tại đảo Cát Bà, Hải Phòng. Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường, 2018.

[5] Mai Trọng Nhuận. Quản lý tổng hợp vùng ven biển. NXB. Đại học Quốc gia Hà Nội, 2009.

[6] TCVN 6625:2000. Xác định chất rắn lơ lửng bằng cách lọc qua cái lọc sợi thủy tinh. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2000.

[7] Trần Đức Thạnh. Hệ sinh thái biển đảo Cát Bà. NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2014.

[8] Lê Thị Vinh và cộng sự. Chất lượng môi trường nước tại các khu vực nuôi cá lồng bè tập trung ven biển Việt Nam. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, 2015.

[9] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2017.

[10] Vigers G., Ong K.-S., Mcpherson C., Mollson N., Watson I., Tang A. (ed.). ASEAN Marine Environmental Management: Quality Criteria and Monitoring for Aquatic Life and Human Health Protection, Canada: Asean-Canada Cooper.Progr.Mar.Sci., 1997.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2026

Phân tích ảnh hưởng của các tham số khí động đến mất ổn định flutter của dầm cầu nhịp lớn

Analysis of flutter derivatives affecting aeroelastic instability of long-span bridge decks

> TS NGUYỄN PHAN ANH[1], TS ĐẶNG XUÂN THAO[2], TS TRẦN NGỌC AN[1,*], PGS.TS NGUYỄN HỒNG SƠN[2]
[1]Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Đại học Công nghiệp Hà Nội
[*]Email: antn.ctt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày xác định vận tốc gió flutter tới hạn của cầu nhịp lớn theo mô hình mặt cắt bằng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh. Phương pháp này cho phép xác định sự biến thiên của độ cản Loga và tần số fluter trên toàn miền vận tốc gió theo cả nhánh uốn và nhánh xoắn. Trên cơ sở đó, ảnh hưởng của các tham số khí động đến mất ổn định flutter được phân tích, đánh giá. Việc đơn giản hóa quá trình tính toán vận tốc gió tới hạn bằng cách bỏ bớt tham số khí động cũng được đề cập. Các kết quả mô phỏng được thực hiện với số liệu của cầu Innoshima, Nhật Bản.

Từ khóa: Mô hình mặt cắt; mất ổn định flutter; phương pháp bước lặp hiệu chỉnh; tham số khí động; cầu Innoshima.

ABSTRACT

The paper presents the determination of the critical flutter wind speed of long-span bridges using a sectional model based on the Revised Step-by-Step method. This approach enables the evaluation of the variation of logarithmic damping and flutter frequency over the entire wind speed range for both heaving and torsional branches. Based on these results, the influence of flutter derivatives on aeroelastic instability is analyzed and assessed. The simplification of the critical wind speed calculation by reducing the number of flutter derivatives is also discussed. Numerical simulations are carried out using data from the Innoshima Bridge.

Keywords: Sectional model; flutter instability; revised step-by-step method; flutter derivatives; Innoshima bridge.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Một trong những dạng mất ổn định nguy hiểm nhất của cầu nhịp lớn là hiện tượng flutter. Hiện tượng này xảy ra khi dầm cầu có dao động uốn và dao động xoắn kết hợp dưới tác dụng của gió. Mô hình mặt cắt 2 bậc tự do của dầm cầu có thể được sử dụng trong phân tích ổn định flutter như được đề cập trong các tài liệu về thiết kế kháng gió [1, 2]. Cũng trong các tài liệu [1, 2], phương pháp phân tích trị riêng phức được dùng để tính toán vận tốc gió flutter tới hạn.

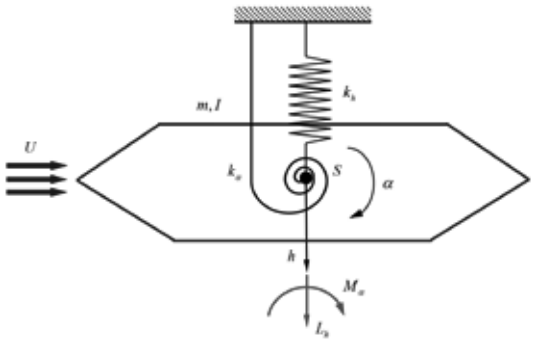
Giáo sư Matsumoto (Đại học Kyoto) đã đề xuất một phương pháp khác để nghiên cứu ổn định flutter của dầm cầu nhịp lớn, đó là phương pháp bước lặp SBS (Step-by-Step) [3-7]. Trong phương pháp này, ban đầu dao động xoắn được giả thiết có dạng điều hòa. Phương pháp SBS tiếp tục được điều chỉnh, hoàn thiện khi bổ sung yếu tố cản vào giả thiết dao động xoắn và được gọi là phương pháp bước lặp hiệu chỉnh RSBS (Revised Step-by-Step) [8, 9]. Độ cản khí động và ảnh hưởng của các tham số khí động (flutter derivatives) đến mất ổn định flutter được đề cập dựa trên phân tích tính toán lý thuyết và thực nghiệm với các mặt cắt chữ nhật [3, 4]. Cơ chế của hiện tượng flutter và flutter xoắn (torsional flutter), cũng như vai trò các tham số khí động tiếp tục được làm rõ trong [5-9]. Cũng trong tài liệu [9], một công thức gần với công thức Selberg được xây dựng để dự đoán vận tốc flutter tới hạn cho cầu nhịp lớn.

Bài báo trình bày việc tính toán vận tốc gió flutter tới hạn bằng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh với giả thiết nghiệm dạng hoàn chỉnh [9]. Vai trò của các tham số flutter đối với mất ổn định flutter được phân tích dựa trên giả thiết nghiệm này, đồng thời đánh giá tính toán vận tốc gió flutter tới hạn trong trường hợp giảm bớt các tham số khí động.

2. NỘI DUNG TÍNH TOÁN

2.1. Mô hình nghiên cứu

Xét mặt cắt dầm cầu như trên Hình 1 với chiều rộng *B*, khối lượng trên một đơn vị dài là *m* và mô-men quán tính khối trên một đơn vị dài là *I*. Độ cứng chống uốn, độ cứng chống xoắn lần lượt là k_h và k_a. Độ cản uốn, độ cản xoắn lần lượt là c_h và c_a. Gió tác dụng vuông góc với dầm cầu với vận tốc *U*. Tâm uốn của mặt cắt dầm cầu là *S*, chuyển vị uốn và chuyển vị xoắn của mặt cắt dầm cầu quanh tâm uốn lần lượt là *h* và *a*.



Hình 1. Mô hình mặt cắt của dầm cầu dao động dưới tác dụng của gió

Phương trình dao động của mặt cắt dầm cầu có thể được viết dưới dạng [1, 2].

$$m\ddot{h}(t)+c_h\dot{h}(t)+k_h h(t)=L_h \quad (1)$$

$$I\ddot{\alpha}(t)+c_\alpha\dot{\alpha}(t)+k_\alpha\alpha(t)=M_\alpha \quad (2)$$

Các lực nâng và mô-men khí động được biểu diễn dưới dạng [1, 2].

$$L_h=\frac{1}{2}\rho U^2B\left[KH_1^*(K)\frac{\dot{h}}{U}+KH_2^*(K)\frac{B\dot{\alpha}}{U}+K^2H_3^*(K)\alpha+K^2H_4^*(K)\frac{h}{B}\right] \quad (3)$$

$$M_\alpha=\frac{1}{2}\rho U^2B^2\left[KA_1^*(K)\frac{\dot{h}}{U}+KA_2^*(K)\frac{B\dot{\alpha}}{U}+K^2A_3^*(K)\alpha+K^2A_4^*(K)\frac{h}{B}\right] \quad (4)$$

Với *r* là khối lượng riêng của không khí, *K* là tần số thu gọn và được xác định:

$$K=\frac{B\omega_F}{U} \quad (5)$$

Trong đó: w_F là tần số flutter và H_i^*, A_i^* (i = 1, 2, 3, 4) là các tham số khí động.

2.2. Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh

Phương pháp bước lặp hiệu chỉnh của GS Matsumoto cho phép phân tích mất ổn định flutter trên cả nhánh uốn và nhánh xoắn.

2.2.1. Nhánh xoắn

Dao động xoắn được giả thiết có dạng [9]:

$$\alpha=\alpha_0e^{-\zeta'_F\omega_F t}\sin\omega_F t \quad (6)$$

Với:

$$\zeta'_F=\frac{\zeta_F}{\sqrt{1-\zeta_F^2}} \quad (7)$$

Hai phương trình xác định độ cản Loga và tần số flutter [9].

$$\delta_F=2\pi\frac{\zeta_\alpha\omega_\alpha}{\omega_F}-\pi\Omega_1A_2^*-\pi\Omega_1\Omega_2\{A_1^*\left|H_2^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}\left(\zeta'_F\sin\theta_1+\cos\theta_1\right)$$
$$+A_1^*\left|H_3^*\right|\left(\zeta'_F\sin\theta_2+\cos\theta_2\right)-A_4^*\left|H_2^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}\sin\theta_1-A_4^*\left|H_3^*\right|\sin\theta_2\} \quad (8)$$

$$\omega_F=[\omega_\alpha^2-\Omega_1\omega_F^2A_3^*-\Omega_1\Omega_2\omega_F^2\{A_1^*\left|H_2^*\right|\left(1+\zeta'^2_F\right)^{3/2}\sin\theta_1+A_1^*\left|H_3^*\right|\left(1+\zeta'^2_F\right)\sin\theta_2$$
$$+A_4^*\left|H_2^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}(\cos\theta_1-\zeta'_F\sin\theta_1)+A_4^*\left|H_3^*\right|(\cos\theta_2-\zeta'_F\sin\theta_2)\}\left(1-\zeta_F^2\right)]^{1/2} \quad (9)$$

2.2.2. Nhánh uốn

Dao động uốn được giả thiết có dạng:

$$h=h_0e^{-\zeta'_F\omega_F t}\sin\omega_F t \quad (10)$$

Hai phương trình xác định độ cản Loga và tần số flutter:

$$\delta_F=2\pi\frac{\zeta_h\omega_h}{\omega_F}-\pi\Omega_1H_1^*-\pi\Omega_1\Omega_2\{H_2^*\left|A_1^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}\left(\zeta'_F\sin\theta_1+\cos\theta_1\right)$$
$$+H_2^*\left|A_4^*\right|\left(\zeta'_F\sin\theta_2+\cos\theta_2\right)-H_3^*\left|A_1^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}\sin\theta_1-H_3^*\left|A_4^*\right|\sin\theta_2\} \quad (11)$$

$$\omega_F=[\omega_h^2-\Omega_1\omega_F^2H_4^*-\Omega_1\Omega_2\omega_F^2\{H_2^*\left|A_1^*\right|\left(1+\zeta'^2_F\right)^{3/2}\sin\theta_1+H_2^*\left|A_4^*\right|\left(1+\zeta'^2_F\right)\sin\theta_2$$
$$+H_3^*\left|A_1^*\right|\sqrt{1+\zeta'^2_F}(\cos\theta_1-\zeta'_F\sin\theta_1)+H_3^*\left|A_4^*\right|(\cos\theta_2-\zeta'_F\sin\theta_2)\}\left(1-\zeta_F^2\right)]^{1/2} \quad (12)$$

3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

3.1. Số liệu đầu vào

Sử dụng các số liệu của cầu Innoshima nối hai miền Honshu và Shikoku, Nhật Bản [10]: Độ cứng chống uốn EI_y = 8,129´10^{13} Nm^2; độ cứng chống xoắn GI_T = 6,45´10^{11} Nm^2; độ cứng chống cong vênh EI_w = 9,695´10^{15} Nm^4; khối lượng trên một đơn vị dài *m* = 20667 kg/m; mô-men quán tính r_bI_P = 2,136´10^6 kgm; chiều dài nhịp *L* = 770 m.

Ta có:

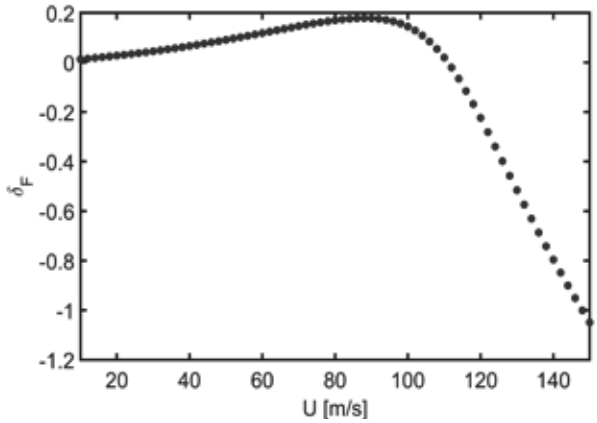
$$I=\rho_bI_P;\ k_h=EI_y\left(\frac{\pi}{L}\right)^4;\ c_h=0;\ k_\alpha=EI_w\left(\frac{\pi}{L}\right)^4+GI_T\left(\frac{\pi}{L}\right)^2;\ c_\alpha=0 \quad (13)$$

Hình 2. Cầu Innoshima (Nhật Bản)

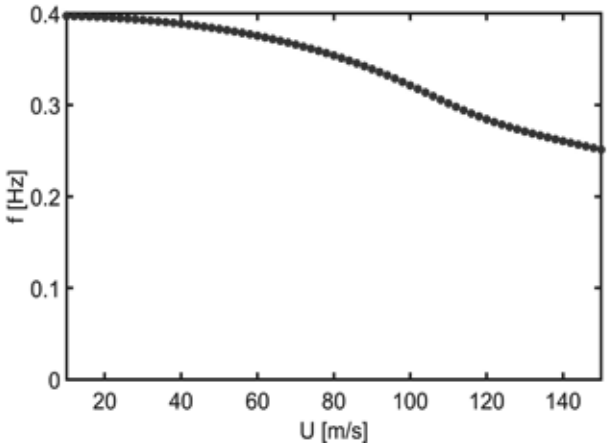
Nguồn: Wikimedia Commons (Vickerman625, 2010), public domain.

3.2. Phân tích mất ổn định flutter

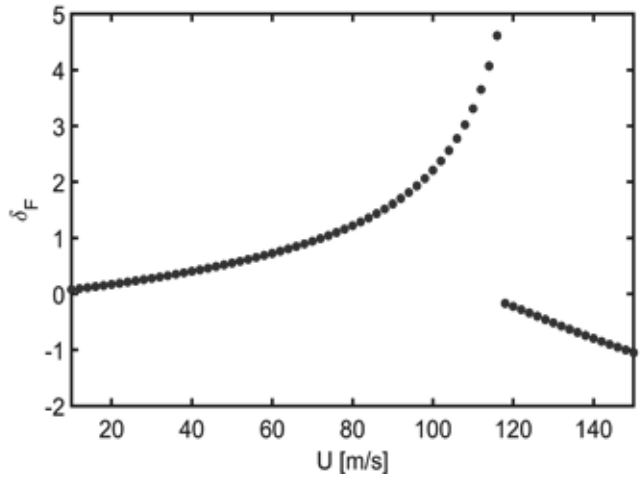
Với các số liệu của cầu Innoshima trình bày trong Mục 3.1, khảo sát vận tốc gió trong khoảng 10 - 150 m/s. Lực gió tác dụng cầu được sử dụng dưới dạng tác dụng lên tấm mỏng [10]. Sử dụng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh, ta xây dựng được quan hệ đồ thị quan hệ giữa vận tốc gió *U* với độ cản Loga và tần số dao động flutter của cầu Innoshima trên cả hai nhánh xoắn và uốn như trên các Hình 3-6. Mất ổn định xảy ra trên nhánh xoắn với vận tốc gió tới hạn tìm được là U_{cr} = 111 m/s, hoàn toàn trùng khớp với tài liệu [10].



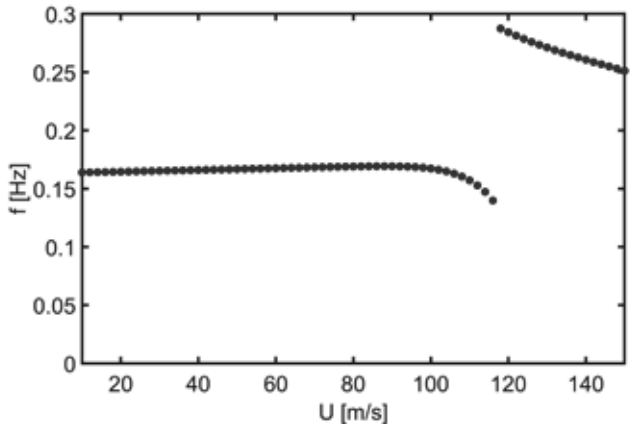
Hình 3. Đồ thị quan hệ U-δ_F trên nhánh xoắn của cầu Innoshima



Hình 4. Đồ thị quan hệ U-f trên nhánh xoắn của cầu Innoshima



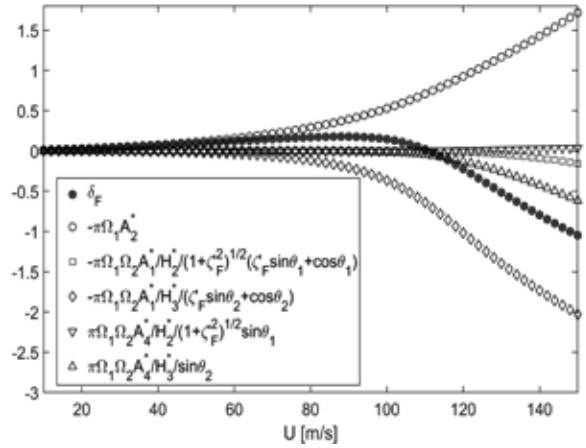
Hình 5. Đồ thị quan hệ U-δ_F trên nhánh uốn của cầu Innoshima



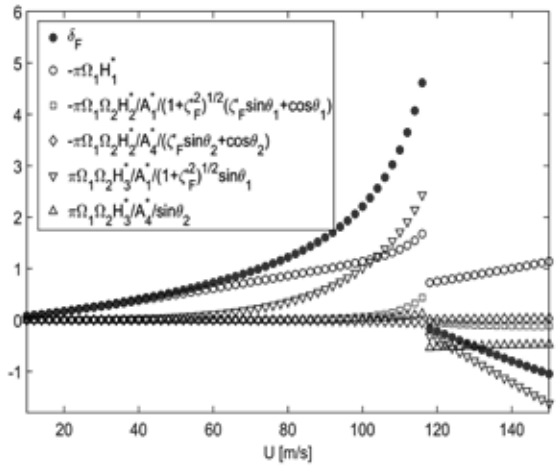
Hình 6. Đồ thị quan hệ U-f trên nhánh uốn của cầu Innoshima

4. ĐÁNH GIÁ VAI TRÒ CỦA CÁC THAM SỐ KHÍ ĐỘNG

Trong mục này sử dụng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh, đánh giá vai trò của các tham số flutter xuất hiện trong các biểu thức độ cản Loga trên nhánh xoắn (8) và trên nhánh uốn (11). Nhận thấy rằng các thành phần A^*_2 và tích $A^*_1H^*_3$ có vai trò chính trong nhánh xoắn (Hình 7). Trong khi đó, các thành phần H^*_1 và tích $A^*_1H^*_3$ có vai trò chính trong nhánh uốn (Hình 8). Các kết quả này là phù hợp với các phân tích trong [3, 5, 7, 8].



Hình 7. Vai trò của các tham số khí động trong hiện tượng flutter, nhánh xoắn



Hình 8. Vai trò của các tham số khí động trong hiện tượng flutter, nhánh uốn

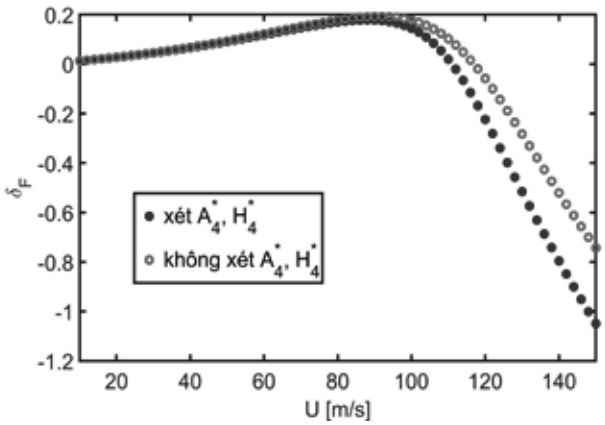
5. ĐƠN GIẢN HÓA TÍNH TOÁN MẤT ỔN ĐỊNH FLUTTER

Như ở trong Mục 4, kết quả mô phỏng số cho thấy các tham số H^*_4 và A^*_4 không có vai trò chính trong ổn định flutter của dầm cầu. Một số tài liệu cũng đã bỏ qua hai tham số này khi mô tả lực nâng và mô-men khí động như các phương trình (14) và (15).

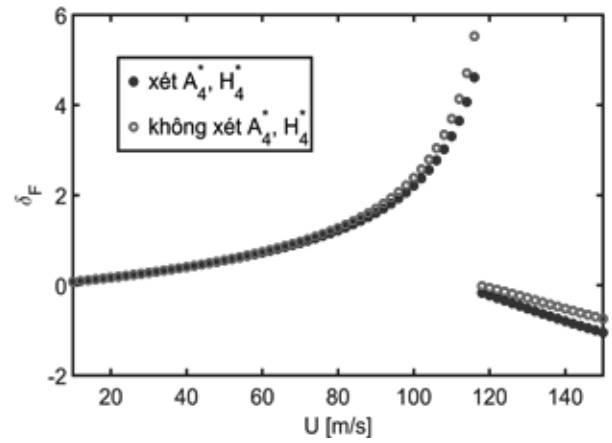
$$L_h = \frac{1}{2}\rho U^2 B\left[KH_1^*(K)\frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K)\frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2H_3^*(K)\alpha\right] \quad (14)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2\left[KA_1^*(K)\frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K)\frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2A_3^*(K)\alpha\right] \quad (15)$$

Các Hình 9 và 10 mô tả sự biến thiên của độ cản Loga khi xét và không xét H^*_4 và A^*_4 trên cả hai nhánh xoắn và uốn. Với vận tốc gió thấp, hai đường cong độ cản Loga khá bám sát, khi vận tốc gió tăng dần lên, đặc biệt ở vùng trên tới hạn, hai đường cong dần tách nhau ra. Sự mất ổn định xảy ra trên nhánh xoắn khi bỏ qua H^*_4 và A^*_4 là 117 m/s, sai số 5,41%. Như vậy, khi xác định vận tốc gió tới hạn một cách gần đúng, ta có thể bỏ qua H^*_4 và A^*_4.



Hình 9. Sự biến thiên độ cản Loga trên nhánh xoắn khi xét và không xét H^*_4 và A^*_4



Hình 10. Sự biến thiên độ cản Loga trên nhánh uốn khi xét và không xét H^*_4 và A^*_4

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phân tích mất ổn định flutter của dầm cầu nhịp lớn theo mô hình mặt cắt bằng phương pháp bước lặp hiệu chỉnh. Các giả thiết nghiệm được sử dụng dưới dạng hoàn chỉnh. Ảnh hưởng của các tham số khí động trong mất ổn định flutter được trình bày dựa trên các giả thiết nghiệm này. Cách tính toán gần đúng vận tốc flutter tới hạn khi giảm bớt các tham số khí động cũng đã được đề cập.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu tiềm năng thiết kế và gia công tối ưu sản phẩm cơ khí có tương tác khí động bằng công nghệ tiên tiến (mã số: 06-2025-NCTN) trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ của Đại học Công nghiệp Hà Nội trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Emil Simiu, Robert H. Scanlan. Wind effects on structures (3rd editon). John Wiley & Sons, 1996.

[2] C. Dyrbye, S.O. Hansen. Wind loads on structures. John Willey & Sons, 1999.

[3] M. Matsumoto, Y. Kobayashi, H. Shirato. The influence of aerodynamic derivatives on flutter. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 60, pp. 227-239, 1996, doi: 10.1016/0167-6105(96)00036-0.

[4] Masaru Matsumoto. Aeroedynamic damping of prisms. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 59, pp. 159-175, 1996, doi: 10.1016/0167-6105(96)00005-0.

[5] Masaru Matsumoto, Yoshiyuki Daito, Fumitaka Yoshizumi, Yasuo Ichikawa, Tadahiro Yabutani. Torsional flutter of bluff bodies. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp. 871-882, 1997, doi: 10.1016/S0167-6105(97)00213-4.

[6] M. Matsumoto, K. Mizuno, K. Okubo, Y. Ito. Torsional flutter and branch characteristics for 2-D rectangular cylinders. Journal of Fluids and Structures, 21, pp. 597-608, 2005, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.07.021.

[7] M. Matsumoto, K. Mizuno, K. Okubo, Y. Ito, H. Matsumiya. Flutter instability and recent development in stabilization of structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, pp. 888-907, 2007, doi: 10.1016/j.jweia.2007.01.015.

[8] Masaru Matsumoto, Kazumasa Okubo, Yasuaki Ito, Hisato Matsumiya, Ginam Kim. The complex branch characteristics of coupled flutter. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, pp. 1843-1855, 2008, doi: 10.1016/j.jweia.2008.02.011.

[9] Masaru Matsumoto, Hisato Matsumiya, Shinya Fujiwara, Yasuaki Ito. New consideration on flutter properties based on step-by-step analysis. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98, pp. 429-437, 2010, doi: 10.1016/j.jweia.2010.02.001.

[10] Banerjee J. R. A simplified method for the free vibration and flutter analysis of bridge decks. Journal of Sound and Vibration, 260, pp. 829 -845, 2003, doi: 10.1016/S0022-460X(02)00929-X.

■Ngày nhận bài: 08/4/2026 ■Ngày sửa bài: 16/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/4/2026

Đánh giá nguyên nhân nứt bản mặt cầu bê tông cốt thép qua quan trắc biến dạng do tải trọng và nhiệt độ môi trường

Assessment of the causes of cracking in reinforced concrete bridge decks through monitoring of deformation due to load and environmental temperature

> TS TRỊNH MINH HẢI*, THS VŨ NGỌC TRINH
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: minhhai.trinh79@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày kết quả khảo sát và đo quan trắc biến dạng/độ mở rộng vết nứt theo nhiệt độ và tải trọng khai thác trong một kết cấu bản mặt cầu (BMC) bê tông cốt thép (BTCT) thực tế, bị nứt khi bị phơi lộ trực tiếp dưới ánh nắng mặt trời và tải trọng. Kết quả đo quan trắc thu được nhằm phục vụ việc đánh giá nguyên nhân và từ đó đưa ra các khuyến cáo khi thi công và sửa chữa dạng kết cấu này.

Từ khóa: Đo biến dạng; bản bê tông; nguyên nhân hư hỏng; biến dạng nhiệt; tải trọng khai thác; thay đổi nhiệt độ.

ABSTRACT

The present study investigates and measures the strains and crack width variations under temperature changes and service loads of a site reinforced-concrete bridge deck that was cracked and directly exposed to sunlight and traffic loads. The measurement results are utilized to assess the causes of damage and subsequently propose recommendations for construction and repair practices of the deck structure.

Keywords: Strain measurement; concrete deck; damage causes; thermal deformation; service loads; temperature changes.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình thực tế, nhóm tác giả đã gặp một công trình cầu BTCT có nhiều vết nứt trên mặt cầu ở đồng bằng sông Cửu Long, nơi có khí hậu nóng ẩm, nền nhiệt và biến đổi nhiệt độ trong ngày khá cao so với cả nước. Cầu được thiết kế với HL-93, kết cấu nhịp cầu chính gồm 3 nhịp khẩu độ (55+90+55)m (N8-N9-N10) dùng dầm hộp bê tông dự ứng lực (DƯL) đúc hẫng cân bằng, kết cấu nhịp cầu dẫn khẩu độ 30 - 40 m dùng dầm Super-T bằng BTCT DƯL.

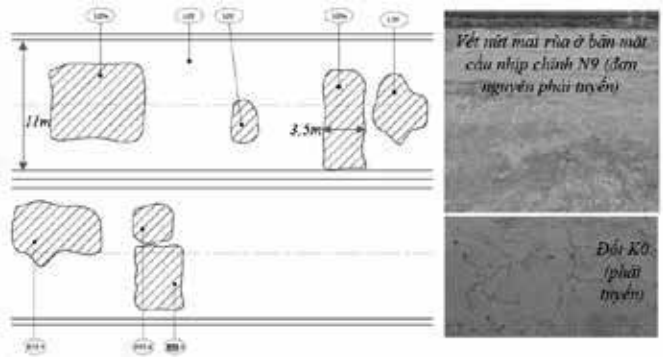
Đặc điểm chịu lực và khai thác của cầu là phần cầu đã hoàn thành toàn bộ mố, trụ, BMC và lan can gờ chắn bánh. BMC đã được đổ BTCT nhưng chưa được thi công lớp phòng nước mặt cầu và lớp thảm mặt cầu. Việc dừng thi công làm cho kết cấu BTCT bị phơi lộ dưới ánh nắng trực tiếp trong thời gian khoảng 6 năm và chịu tải trọng khai thác là các phương tiện giao thông địa phương, các xe tải nặng chở vật liệu thi công trên tuyến. Khi dự án được tái khởi động, kết cấu cầu đã được khai thác hạn chế từng nhánh một trong các thời điểm khác nhau cho xe chở vật liệu thi công các hạng mục còn lại của gói thầu (chủ yếu là phần đường). Quá trình kiểm tra hiện trạng kết cấu cầu trước khi tiếp tục thi công đối với các hạng mục còn lại để đưa công trình khai thác phát hiện một số khiếm khuyết, tồn tại cần khắc phục bao gồm: (i) Nứt bê tông trên bề mặt BMC ở cả phần nhịp dẫn và phần nhịp chính; (ii) Các vết nứt dọc ở đáy BMC trong lòng hộp dầm nhịp chính ở cả hai đơn nguyên, trong đó nhánh phải tuyến xuất hiện nhiều vết nứt hơn, phạm vi kéo dài hơn.

Phạm vi bài báo chỉ tập trung phân tích với kết cấu nhịp chính. Từ các tồn tại trên trên, cần thực hiện công tác kiểm định với mục đích: (i) Kiểm tra đánh giá cường độ bê tông BMC; (ii) Xác định nguyên nhân gây nứt trên bề mặt BMC, nứt dọc ở đáy BMC. Đánh giá ảnh hưởng của vết nứt đối với khả năng chịu lực của kết cấu, độ bền vững lâu dài của công trình để có biện pháp khắc phục trước khi tiếp tục thảm hoàn thiện mặt cầu và đưa công trình vào khai thác; (iii) Thử tải tĩnh và động với nhằm đánh giá ứng xử của kết cấu, đánh giá khả năng chịu lực thực tế của kết cấu nhịp so với tính toán lý thuyết và yêu cầu thiết kế; (iv) Đề xuất biện pháp xử lý đối với vết nứt BMC, dầm cầu và các hư hỏng cục bộ khác phát hiện trong quá trình kiểm định.

Trong nhóm các nguyên nhân gây ra vết nứt thì biến dạng do ảnh hưởng của ứng suất nhiệt cũng là một trong các yếu tố cần nghiên cứu. Nhóm tác giả đã khảo sát và quan trắc nhiệt độ môi trường, nhiệt độ (nhiệt độ) bề mặt kết cấu, biến dạng của kết cấu ở các vị trí có vết nứt kết cấu để xác định ảnh hưởng của ứng suất nhiệt.

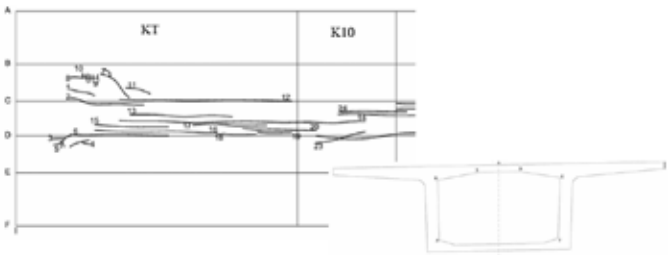
2. HIỆN TRẠNG NỨT BMC NHỊP CHÍNH

Vết nứt bề mặt phía trên BMC ở 2 đơn nguyên phải và trái tuyến. BMC nhịp chính là bản nắp dầm hộp bằng BTCT đổ tại chỗ cấp C40 (f'c = 40 MPa). Dạng vết nứt ở mặt trên BMC có dạng nứt lưới mai rùa và nứt lưới ô vuông xuất hiện theo các khu vực nhất định, không nứt toàn bộ bề mặt. Các khu vực xuất hiện vết nứt xuất hiện mang tính ngẫu nhiên, gắn liền với các lần thi công bê tông hoặc hoàn thiện bề mặt khi thi công đổ bê tông. Khu vực bị nứt dạng mai rùa thường là khu vực có bề mặt bê tông có nhiều xi măng, ít cốt liệu lớn dẫn tới bị co ngót cục bộ.



Hình 1. Sơ họa một số khu vực nứt BMC dạng mai rùa trên 3 nhịp chính và 2 đơn nguyên

Đáy bản nắp dầm hộp xuất hiện nhiều vết nứt với các đặc trưng: (i) Vết nứt dọc đáy bản (đồng thời là BMC) xuất hiện nhiều và nhiều hơn ở đơn nguyên phải tuyến; (ii) Theo phương ngang cầu, phạm vi xuất hiện vết nứt dọc là ở đáy bản nắp phần giữa bản có chiều dày 250 mm không đổi, số lượng vết nứt từ 1 - 5 vết, khoảng cách các vết nứt dọc khoảng 45 cm. Theo phương dọc cầu, vết nứt dọc xuất hiện trong phạm vi khoảng giữa tất cả các nhịp; ở gần giữa nhịp vết nứt có độ mở rộng lớn khoảng 0,25 mm, chiều sâu từ 50 - 90 mm và nhiều vết nứt hơn; về gần trụ thì mức độ nứt giảm dần, độ mở rộng vết nứt 0,15 - 0,2 mm, chiều sâu vết nứt 30 - 50 mm; (iii) Đơn nguyên phải và trái có số lượng, mật độ vết nứt, sự phân bố tương tự nhau. Phải tuyến có khoảng 471 vết nứt (trái tuyến 404), có chiều dài từ 0,1 m đến 9 m, độ mở rộng từ 0,1 mm đến 0,5 mm. Số vết nứt có độ mở rộng từ 0,25 mm là 228 vết nứt (trái tuyến là 201).



Hình 2. Sơ họa vết nứt dọc ở đáy BMC dầm hộp, vị trí BCDE N8 - đơn nguyên trái tuyến

Ngoài ra, các vết nứt xiên mặt trong và ngoài sườn dầm hộp cũng xuất hiện nhưng không đề cập trong phạm vi bài báo này.

3. KẾT QUẢ KIỂM TRA CHẤT LƯỢNG BÊ TÔNG VÀ QUAN TRẮC BIẾN DẠNG/ĐỘ MỞ RỘNG VẾT NỨT THEO NHIỆT ĐỘ

3.1. Kết quả kiểm tra chất lượng bê tông

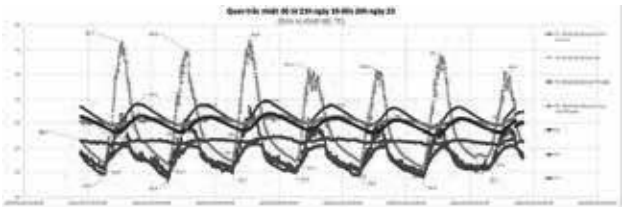
Kết quả kiểm tra chất lượng bê tông cho thấy, tại các vị trí bê tông không xuất hiện khuyết tật, chất lượng bê tông đảm bảo theo yêu cầu thiết kế.

3.2. Bố trí điểm đo nhiệt độ và biến dạng/độ mở rộng vết nứt

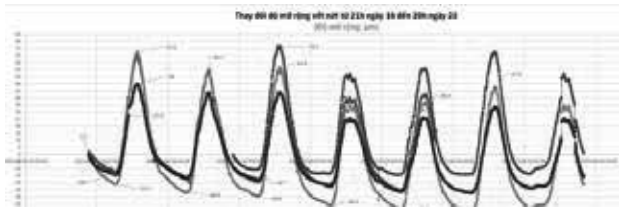
Để đánh giá nguyên nhân gây nứt bản mặt dầm hộp, tiến hành quan trắc ứng suất biến dạng tại 2 mặt cắt (giữa nhịp 90 m và vị trí đuôi vết nứt dọc BMC gần đỉnh trụ) trong thời gian liên tục trong 7 ngày. Thời gian theo dõi trải qua thời điểm có nắng và nhiệt độ tương đối cao. Trong quá trình đo ứng suất/biến dạng, ứng với mỗi lần đọc số liệu biến dạng gồm: (i) Đo nhiệt độ không khí; (ii) Đo nhiệt độ trong lòng hộp; (iii) Đo nhiệt độ mặt bê tông phía ngoài dầm hộp: Mặt trên, mặt sườn, mặt đáy; (iv) Quan trắc nhiệt độ môi trường, nhiệt độ bề mặt kết cấu ở các vị trí có vết nứt kết cấu để xác định ảnh hưởng của ứng suất nhiệt.

Hình 3. Bố trí điểm đo quan trắc nhiệt độ và biến dạng/độ mở rộng vết nứt

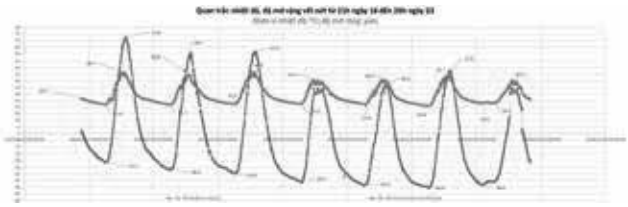
3.3 Kết quả quan trắc nhiệt độ trong 7 ngày



Hình 4. Kết quả quan trắc nhiệt độ



Hình 5. Kết quả quan trắc thay đổi độ mở rộng vết nứt



Hình 6. Kết quả quan trắc nhiệt độ và thay đổi độ mở rộng vết nứt BMC trong 7 ngày

Bảng 1. Kết quả quan trắc chênh nhiệt độ lớn nhất trong 7 ngày

Vị trí điểm đo nhiệt	Nhiệt độ bề mặt trong ngày		Độ chênh nhiệt trong ngày (°C)
	Max (°C)	Min (°C)	
T1 (Nhiệt độ không khí trên mặt cầu)	33	19,7	13,3
T2 (Nhiệt độ bề mặt BT trên mặt cầu)	46,7	21,9	24,8

T3 (Nhiệt độ bề mặt đáy bản nắp - MC giữa nhịp	34,8	30	4,8
T4 (Nhiệt độ bề không khí trong hộp - MC giữa nhịp)	31,5	29,7	1,8
T5 (Nhiệt độ bề mặt đáy bản nắp - MC gần đỉnh trụ P8)	32,1	28,7	3,4
T6 (Nhiệt độ bề không khí lòng hộp - MC gần đỉnh trụ)	27,5	26	1,5
T7 (Nhiệt độ không khí mặt đáy hộp)	26,2	19,2	7

Từ kết quả quan trắc nhiệt độ ta cũng có kết quả đo chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong ngày giữa bề mặt bê tông trên mặt cầu (điểm đo T2: 46,7°C) và bề mặt đáy bản nắp (điểm đo T3: 30,4°C) vào buổi trưa là 16,3°C.

Từ kết quả quan trắc nhiệt độ, ta thấy: (i) Nhiệt độ không khí đo được có giá trị lớn nhất là 33°C, thấp nhất là 18,9°C, chênh lệch lớn nhất là 13,3°C; (ii) Nhiệt độ trong lòng hộp đo được có giá trị lớn nhất là 31,5°C, thấp nhất là 29,3°C, chênh lệch lớn nhất là 1,8°C; (iii) Nhiệt độ mặt bê tông phía ngoài dầm hộp, phía trên bề mặt cầu đo được có giá trị lớn nhất là 46,7°C, thấp nhất là 20,9°C, chênh lệch lớn nhất là 24,8°C; (iv) Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất tại 1 thời điểm trong ngày giữa bề mặt bê tông phía trên bề mặt cầu và phía đáy bản nắp đo được có giá trị lớn nhất là 16,3°C tại thời điểm giữa trưa.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả quan trắc thay đổi độ mở rộng vết nứt trong 7 ngày

Điểm đo nứt dọc	**Độ mở rộng vết nứt**		**Chênh lệch/Biên độ thay đổi độ mở rộng vết nứt trong ngày lớn nhất (mm)**
	Max (μm)	**Min (μm)**	
U1 (giữa bản nắp)	68,4	-13,2	0,0816
U2 (cạnh bản nắp)	72,8	-21,1	0,0939
U3 (giữa bản nắp gần đỉnh trụ P8)	50	-14,6	0,0646
U4 (giữa bản nắp gần đốt K6)	76,7	-11	0,0877

4. PHÂN TÍCH NGUYÊN NHÂN GÂY NỨT

4.1. Nứt bề mặt phía trên BMC

Cầu kết thúc thi công phần kết cấu BTCT từ 9/2019, tại thời điểm hoàn thành cơ bản không ghi nhận các vết nứt trên các bộ phận kết cầu nói chung và ở BMC nói riêng (qua các BBNT giai đoạn trong HSHC và kết quả kiểm định chất lượng công trình). Trong giai đoạn từ cuối năm 2019 đến khi khởi động lại dự án vào năm 2024, không có các hoạt động kiểm tra đánh giá tình trạng công trình. Các vết nứt trên BMC chỉ được phát hiện vào thời điểm kiểm tra công trình để bàn giao cho nhà thầu mới thực hiện thảm và hoàn thiện mặt cầu. Như vậy, vết nứt hình thành và phát triển trong giai đoạn dừng thi công từ cuối năm 2019 đến nay. Với kết quả thu thập các thông tin về hệ thống vết nứt, nhóm tác giả phân tích nguyên nhân gây nứt và đưa ra các nhận định sau:

- Vết nứt xuất hiện ở các khu vực có liên quan đến công tác thi công và chất lượng của công tác thi công vì các lý do sau: Sự phân bố của vết nứt không theo đặc điểm của kết cấu mà xuất hiện ở các khu vực liên quan đến các giai đoạn thi công (đốt đúc thi công, phạm vi đổ bê tông cùng đợt) hoặc liên quan đến chất lượng hoàn thiện bê tông bề mặt (cùng một đốt thi công, phạm vi đổ bê tông cùng đợt nhưng mức độ xoa gạt làm cho bề mặt có lượng xi măng, cấp phối chứa nhiều hạt nhỏ bị nứt nhưng những chỗ xung quanh không nứt hoặc nứt ít hơn, nứt do co ngót và cưỡng bức cục bộ).

- Nguyên nhân gây nứt là do công tác hoàn thiện và bảo dưỡng bê tông cũng như tác động môi trường mà không phải do yếu tố tải trọng bản thân và hoạt tải khai thác (chưa khai thác). Tác động của môi trường là sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt kết cấu cũng như độ ẩm môi trường. Tính chất của vật liệu là sự co ngót của bê tông theo thời gian. Vết nứt dạng mai rùa do sự co ngót cục bộ cũng như sự không đồng nhất vật liệu bê tông. Vết nứt dạng lưới chữ nhật hoặc ô vuông tại vị trí cốt thép là do sự sụt của bê tông tươi khi chiều dày lớp bảo vệ mỏng.

- Hiện tượng bề mặt nứt xuất phát từ ảnh hưởng của ứng suất nhiệt cơ bản không có cơ hội xuất hiện và phát triển nếu sau khi bê tông BMC đủ cường độ thì tiếp tục thi công lớp thảm vì trong trường hợp đó gradient nhiệt độ và sự biến đổi nhiệt độ theo thời gian ở BMC không cực đoan như trường hợp không có lớp thảm bê tông nhựa. Giả sử trong thời gian chưa thảm có các chu trình ứng suất nhiệt cực đoan thì số lượng vết nứt, phạm vi có nứt cũng không nhiều, độ mở rộng vết nứt nhỏ vì quá trình gây nứt không lặp đi lặp lại.

4.2. Nứt dọc ở mặt dưới BMC dầm hộp

Về mặt chịu lực, BMC làm việc theo phương ngang cầu và chủ yếu chịu hoạt tải cũng như tác động nhiệt. Vết nứt dọc chỉ được phát hiện trong lần kiểm tra vào tháng 10/2024. Khác với vết nứt trên bề mặt BMC, bề mặt ở dưới đáy BMC phân bố có tính quy luật và phù hợp với dạng vết nứt uốn theo phương ngang do hoạt tải mà không thể hiện sự liên quan tới trình tự thi không và chất lượng vật liệu. Do cầu đã khai thác trong một thời gian ngắn, các hoạt tải nặng qua cầu là xe chở vật liệu thi công cho dự án (xe chạy trên BMC chưa có lớp thảm bê tông nhựa) nên nguyên nhân nứt do hoạt tải cũng cần được xem xét. Tuy nhiên, thời gian khai thác chưa nhiều khi do chưa có khe co giãn giữa nhịp dẫn và nhịp chính nên các xe chỉ có thể đi qua từng chiếc một nên ảnh hưởng của hoạt tải để gây ra vết nứt là không nhiều.

Với các thông tin trên, nhóm tác giả tìm hiểu nguyên nhân gây nứt dọc ở đáy bản nắp dầm hộp theo hai hướng: (i) Thiết kế BMC có hệ số an toàn thấp hoặc bố trí cốt thép cấu tạo thiếu; (ii) Các yếu tố tác động ngoài dự báo thiết kế, cụ thể là ứng suất/biến dạng nhiệt do sự chênh lệch nhiệt độ trên bề mặt và phần dưới kết cấu dầm hộp. Việc rà soát hồ sơ thiết kế phục vụ hướng nghiên cứu thứ 1, việc thử tải (đo biến dạng/độ mở rộng vết nứt dưới tác dụng của hoạt tải thử) và quan trắc biến dạng nhiệt phục vụ hướng nghiên cứu thứ 2.

Kết quả nghiên cứu cho thấy: Thiết kế BMC để chịu lực theo phương ngang về mặt bề dày, cường độ bê tông với bề rộng mặt cắt ngang tương tự cũng giống đa số các cầu dầm mặt cắt 1 hộp có cùng bề rộng mặt cắt ngang. Tuy nhiên, bố trí cốt thép ngang ở đáy bản (chống nứt dọc do uốn của hoạt tải gây ra và cốt thép cấu tạo chống co ngót, ứng suất nhiệt) có hàm lượng ít hơn ở thiết kế tương tự ở các dự án khác. Cụ thể, đối với các cầu dầm hộp có cùng bề rộng mặt cắt ngang, cốt thép thường theo phương ngang ở cầu bố trí thép D16@300, trong khi một số dự án khác bố trí thép D16@150 hoặc thép D20@200. Trường hợp không có cáp DƯL ngang, các cầu thường bố trí cốt thép ngang là D20@150 hoặc D22@150. Ngoài ra, khoảng cách giữa các cốt thép DƯL ở bản theo phương ngang cầu là 1.000 mm (khu vực giữa nhịp) và 1.250 mm (khu vực gần trụ) là khá lớn so với các thiết kế khác. Như vậy, về mặt thiết kế, khi kiểm

toán trạng thái giới hạn cường độ đạt nhưng ở trạng thái giới hạn sử dụng có thể không đảm bảo yêu cầu về khống chế độ mở rộng vết nứt.

Kết quả quan trắc cho thấy, bề rộng vết nứt thay đổi theo sự thay đổi của nhiệt độ bề mặt bên trên của BMC hay gradient nhiệt độ trên chiều dày bản. Nhiệt độ bề mặt phụ thuộc vào mức độ bức xạ nhiệt của mặt trời và thường là rất cao trong các ngày trời quang mây và có độ chênh nhiệt độ ngày đêm lớn.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả quan trắc thay đổi độ rộng vết nứt dọc đáy bản dầm hộp và nhiệt độ bề mặt kết cấu

Vị trí/ Điểm đo	Nhiệt độ bề mặt trong ngày (°C)			Biên độ thay đổi độ rộng vết nứt (mm)	Độ mở rộng vết nứt lớn nhất do hoạt tải (mm)
	Max	Min	Độ chênh nhiệt		
T2 - U2	46,7	19,6	27,1	0,0939	0,0258

Kết quả đo độ mở rộng vết nứt do hoạt tải cho thấy độ mở rộng vết nứt do hoạt tải thử xếp bất lợi theo phương ngang cầu bằng khoảng 27,5% biên độ thay đổi độ mở rộng vết nứt do ứng suất nhiệt gây ra trong thời gian quan trắc 7 ngày. Cần lưu ý thời gian quan trắc ngắn nên chưa phải là biên độ lớn nhất xuất hiện hàng năm. Như vậy, đánh giá nguyên nhân gây nứt xuất phát từ việc kết hợp giữa: (i) Thiết kế chịu lực theo phương ngang có hệ số an toàn thấp, bố trí cốt thép cấu tạo có xu hướng tiết kiệm; (ii) Ứng suất ở đáy BMC (phạm vi có chiều dày không đổi bằng 250 mm) do ứng suất nhiệt và hoạt tải xe lớn hơn khả năng chịu kéo của bê tông gây nứt. Ứng suất nhiệt cũng có tính chất lặp đi lặp lại theo chu trình ứng suất hàng ngày (ngày nắng to) gây nứt dọc ở đáy BMC trong phạm vi chiều dày bản không thay đổi.

Đặc điểm ứng suất nhiệt đang xét là gây uốn BMC theo phương ngang, phạm vi nguy hiểm nhất là trong khoảng giữa có chiều dày bản không đổi và mỏng nhất (250 mm). Khi nhiệt độ mặt trên bản cao nhất thì ứng suất kéo (hoặc độ mở rộng vết nứt khi đã nứt) đạt giá trị lớn nhất. Vết nứt uốn chỉ xuất hiện ở đáy bản mà không thể nứt xuyên qua cả chiều dày bản vì khi đó theo phương ngang cầu phía trên là vùng nén. Khảo sát bề mặt vết nứt cho thấy tình trạng khô ráo, không có dấu hiệu bị ẩm hoặc hiện tượng nhũ đá, cũng khẳng định kết luận này.

BMC có bố trí cốt thép thường và cốt thép DƯL để chịu lực theo phương ngang cơ bản giống nhau theo phương dọc cầu, tuy nhiên khu vực bị nứt nhiều hơn tập trung ở giữa các nhịp. Nguyên nhân của hiện tượng này được giải thích bằng yếu tố sau: Ở giữa nhịp chiều cao sườn dầm nhỏ, độ cứng chống uốn ngang sườn dầm lớn hơn => ảnh hưởng của độ cứng ngang sườn dầm làm giảm hiệu quả của DƯL ngang đối với khu vực giữa 2 sườn dầm sẽ lớn hơn.

4.3. Đánh giá ảnh hưởng của vết nứt tới khả năng chịu lực và độ bền lâu dài

Với các vết nứt có nguyên nhân từ thi công và tác động từ ứng suất nhiệt thì không ảnh hưởng đến khả năng chịu lực. Tuy nhiên, khi để các vết nứt này tiếp tục phát triển trong giai đoạn vận hành khai thác công trình cầu thì sẽ ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và độ bền lâu dài. Với các vết nứt có nguyên nhân do thiết kế có hệ số an toàn thấp, do bố trí cốt thép cấu tạo không đảm bảo khả năng khống chế độ nứt, có thể ảnh hưởng tới khả năng chịu lực và độ bền lâu dài.

5. KẾT LUẬN

Đối với vết nứt dọc ở đáy bản nắp dầm hộp cầu chính là do ứng suất nhiệt gây ra bởi gradient nhiệt (chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt của bản) và do hàm lượng cốt thép ngang lớp dưới ít cũng như ảnh hưởng của lực hướng tâm do độ cong của cáp DƯL ngang cầu. Tổ hợp hoạt tải xe gồm các bánh xe đi giữa lòng hộp theo phương ngang + nhiệt độ bề mặt trên của bản lớn nhất (buổi trưa, chiều ngày trời nắng) là tổ hợp gây ứng suất kéo theo phương ngang lớn nhất ở đáy bản. Tuy nhiên, các vết nứt này không ảnh hưởng hoặc ảnh hưởng không đáng kể (trong phạm vi cho phép về mặt kỹ thuật) đối với khả năng chịu lực tổng thể của kết cấu. Kiến nghị biện pháp sửa chữa với các vết nứt dạng này là: (i) Thực hiện việc sửa chữa các vết nứt ở bề mặt BMC trước khi thi công lớp phòng nước và thảm mặt cầu; (ii) sửa chữa các vết nứt dọc ở đáy BMC chính dầm hộp bằng bơm keo epoxy hoặc quét keo epoxy tùy vào độ mở rộng của vết nứt, ở vị trí giữa nhịp có thể tăng cường đáy bản vật liệu FRP bám dính ngoài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Báo cáo kinh tế - kỹ thuật Công trình. Hồ sơ hoàn công công trình và các tài liệu liên quan.

[2] Các quy trình, quy phạm: TCVN 12882 - 2020; 22TCN 243 - 98; 22TCN 272 - 05; TCVN 11823 -2017; 22TCN 18 - 79; TCVN 9335 - 2012; TCVN 9356 - 2012; TCVN 9357 - 2012 (thay thế TC mới 2022; TCVN 13537:2022; TCVN 12252 : 2020; TCVN 5574 - 2018; TCXDVN 239 - 2006; Tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LRFD 2017 (tham khảo); Hướng dẫn đánh giá cầu theo hệ số tải trọng 2011 của AASHTO; Hướng dẫn Mỹ đánh giá cầu 2010 với các bổ sung 2013 của AASHTO.

[3] Đánh giá các giải pháp sửa chữa gia cường bảo vệ kết cấu cầu. Hội KHKT Cầu đường Việt Nam, 2017.

■Ngày nhận bài: 23/3/2026 ■Ngày sửa bài: 01/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 09/4/2026

Nghiên cứu ứng dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" trong phần mềm RM bridge để xác định các thông số động lực học kết cấu cầu đường sắt tốc độ cao

Research on the application of the "Fast Rolling Stock" module in RM bridge software to determine dynamic parameters of high-speed railway bridge structures

> THS.NCS NGUYỄN HỮU GIANG[1], TS NGUYỄN ANH TUẤN[2], THS.NCS NGUYỄN HỮU ANH[1,*]
[1]Nhóm nghiên cứu: Vật liệu Tiên tiến và Hệ thống thông minh cho hạ tầng và ĐSTĐC (AMIS-HSR), Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[2]Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[*]Email: anhnh89@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc dạng dầm hộp nhịp giản đơn với chiều dài nhịp 30 m, sử dụng bê tông có cường độ chịu nén đặc trưng f'c=45 MPa và cáp dự ứng lực có đường kính 15,2 mm. Nghiên cứu được thực hiện bằng mô-đun "Fast Rolling Stock" trong phần mềm RM Bridge để phân tích tương tác động lực học giữa tàu và cầu, với tốc độ của đoàn tàu là 250 km/h và 350 km/h. Kết quả phân tích chỉ ra rằng, giá trị vận tốc, gia tốc và chuyển vị của cầu đều nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn Eurocode và không xuất hiện hiện tượng cộng hưởng trong cả hai trường hợp vận tốc. Các kết quả này khẳng định tính khả thi và hiệu quả của việc sử dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" trong thiết kế và phân tích kết cấu cầu ĐSTĐC tại Việt Nam.

Từ khóa: Đường sắt tốc độ cao; Fast Rolling Stock; RM Bridge; động lực học; hiện tượng cộng hưởng.

ABSTRACT

This paper analyzes the dynamic response of a high-speed railway bridge structure in the form of a simply supported box girder with a span length of 30 m, constructed using concrete with a characteristic compressive strength of f'c=45 MPa and prestressed cables with a diameter of 15.2 mm. The study is conducted using the "Fast Rolling Stock" module in RM Bridge software to evaluate the train-bridge dynamic interaction at train speeds of 250 km/h and 350 km/h. The analysis results indicate that the bridge's displacement, velocity, and acceleration remain within the permissible limits specified by Eurocode standards, with no resonance phenomena observed at either speed. These findings confirm the feasibility and effectiveness of employing the "Fast Rolling Stock" module for the design and dynamic analysis of high-speed railway bridge structures in Vietnam.

Keywords: High-speed railway; Fast Rolling Stock; RM Bridge; dynamics; resonance phenomenon.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Luật Đường sắt 2017 quy định: Đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) là một loại hình đường sắt quốc gia có tốc độ thiết kế từ 200 km/h trở lên, có khổ đường 1.435 mm, đường đôi, điện khí hóa (2017) [1].

Hiệp hội Đường sắt quốc tế (UIC) định nghĩa ĐSTĐC là một hệ thống cho phép tàu khai thác với vận tốc ≥ 250 km/h trên tuyến đường sắt xây dựng mới, hoặc từ 200 km/h trên tuyến đường sắt hiện tại.

Theo Tiêu chuẩn EN 1991-2: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges (2003) [2], quy định liên quan đến gia tốc dọc (vertical acceleration) để hành khách có cảm giác dễ chịu trên tàu cao tốc và độ bền của kết cấu cầu về động lực học, đặc biệt chú ý đến hiện tượng cộng hưởng gây bất lợi cho kết cấu ĐSTĐC [2, 3, 4]. Hiện nay trên thế giới, việc mô hình và tính toán ứng xử động lực học giữa tàu - cầu thường sử dụng các phần mềm phân tích kết cấu như Midas, SAP2000, Abaqus, RM Bridge… Trong đó,

phần mềm RM Bridge với mô-đun "Fast Rolling Stock Analysis" được ứng dụng rất hiệu quả để tính toán gia tốc thẳng đứng của dầm theo vận tốc và chủng loại tàu.

Fast Rolling Stock là một mô-đun trong RM Bridge, được thiết kế đặc biệt để mô phỏng và phân tích các hiệu ứng động lực học cho các kết cấu cũng như cho đoàn tàu chạy qua kết cấu cầu.

Mô-đun này giúp phân tích ứng xử giữa kết cấu nhịp cầu và đoàn tàu. Trong đó, các thông số như tốc độ, khối lượng đoàn tàu, đặc tính hệ thống treo và quỹ đạo di chuyển được đưa vào mô hình để xác định các phản ứng của cầu.

Do đó, nghiên cứu ứng dụng này để áp dụng cho công tác tính toán, phân tích lựa chọn kết cấu dầm cầu cho các dự án ĐSTĐC.

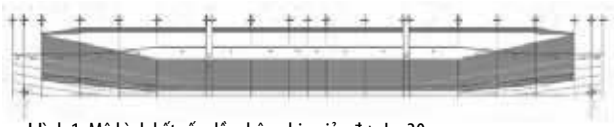
2. NGHIÊN CỨU MÔ-ĐUN "FAST ROLLING STOCK" XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ ĐỘNG LỰC HỌC KẾT CẤU

2.1. Mô hình kết cấu

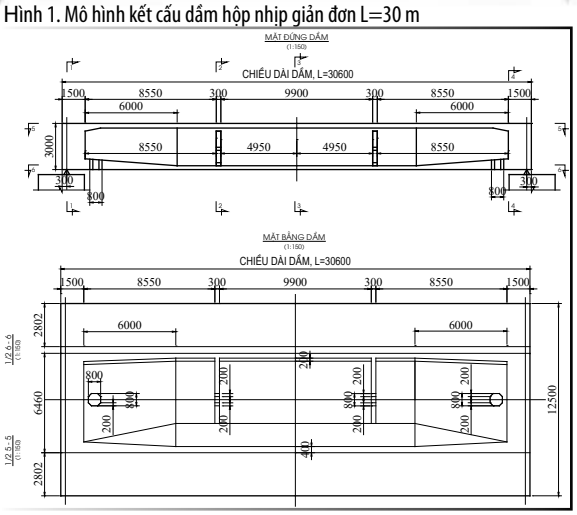
Trong nghiên cứu này, sử dụng phần mềm RM Bridge để mô hình hóa và tính toán động lực học của cầu ĐSTĐC. Chiều dài dầm tính toán L = 30 m (chiều dài thực tế dầm 30,6 m), kết cấu dầm hộp nhịp giản đơn, chiều cao dầm H = 3,00 m (L/10,0) (Hình 1, Hình 2). Các thông số đầu vào để mô hình mặt cắt như: Chiều cao dầm, chiều rộng của dầm và bề dày bản bụng, cánh dầm… Hình 4 được tham khảo trong công bố khoa học của H. Xia and N. Zhang (2005) [5]. Chiều dài dầm nghiên cứu tương đương với các chiều dài dầm được sử dụng trong một số kết cấu cầu ĐSTĐC đang được các đơn vị tư vấn thiết kế [6] tại Việt Nam như: TEDI, TRICC… đề xuất cho dự án ĐSTĐC Bắc - Nam (2022) [7].

Cáp dự ứng lực: Sử dụng 10 bó cáp dự ứng lực, mỗi bó 12 tao loại tao có đường kính 15,2 mm (10B12T15.2) được bố trí như Hình 3.

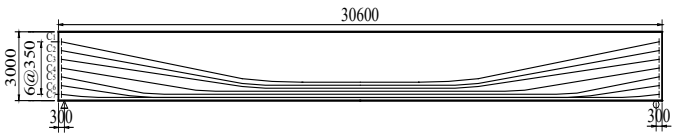
Bê tông dầm có cường độ chịu nén đặc trưng f_c'= 45 MPa, trọng lượng riêng γ_c= 24,5 kN/m^3; hệ số poisson: 0,3; mô-đun đàn hồi E_c = 39.440.000 kN/m^2; hệ số giãn nở nhiệt: 1,17*10^{-5}.



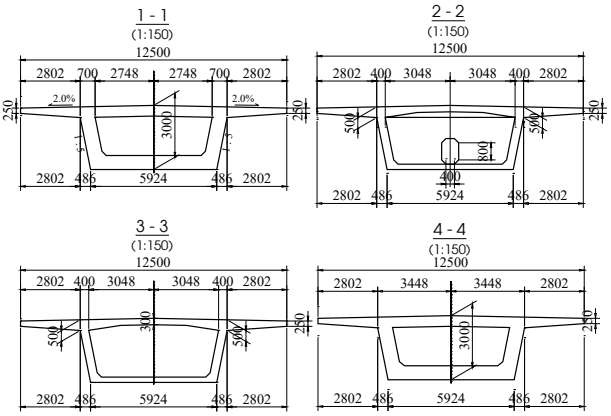
Hình 1. Mô hình kết cấu dầm hộp nhịp giản đơn L=30 m



Hình 2. Cấu tạo dầm giản đơn L= 30 m



Hình 3. Cáp dự ứng lực dầm hộp



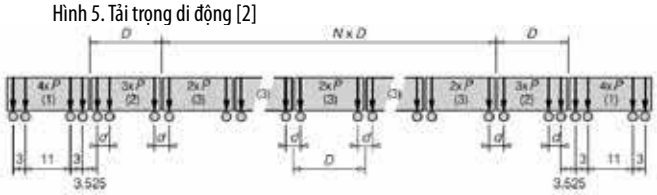
Hình 4. Mặt cắt ngang dầm hộp [5]

Nghiên cứu này sử dụng tải trọng đoàn tàu trong tiêu chuẩn Eurocode 1 - đoàn tàu được giả định là các tải trọng di động như Hình 5, Hình 6. Tải trọng trục và khoảng cách các trục của đoàn tàu theo Bảng 1.

Trong nghiên cứu này, tải trọng đoàn tàu được xác định theo các quy định trong EN 1991-2 [2], trong đó đoàn tàu được giả định như một hệ tải trọng di động tác dụng lên kết cấu cầu. Cụ thể, mô hình tải trọng được biểu diễn dưới dạng chuỗi các tải trọng trục chuyển động với vận tốc không đổi dọc theo nhịp cầu, như minh họa trong Hình 5 và Hình 6.

Giá trị tải trọng trục và khoảng cách giữa các trục được thiết lập theo quy định tiêu chuẩn EN 1991-2 [2] và được trình bày chi tiết trong Bảng 1. Cách tiếp cận này cho phép mô phỏng hợp lý tương tác động lực giữa đoàn tàu và kết cấu cầu, đồng thời đảm bảo tính nhất quán với các giả thiết thiết kế cầu đường sắt trong hệ thống tiêu chuẩn châu Âu.

Hình 5. Tải trọng di động [2]



Hình 6. Mô hình đoàn tàu HSLM-A [2]

Bảng 1. Giá trị các thông số đoàn tàu HSLM-A [2]

Loại tàu	Số toa tàu ở giữa N	Chiều dài toa tàu D(m)	Khoảng cách trục d (m)	Tải trọng trục P (kN)
A1	18	18	2	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	30	2	180
A4	15	21	3	190
A5	14	22	22	170
A6	13	23	2	180
A7	13	24	2	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2	210
A10	11	27	2	210

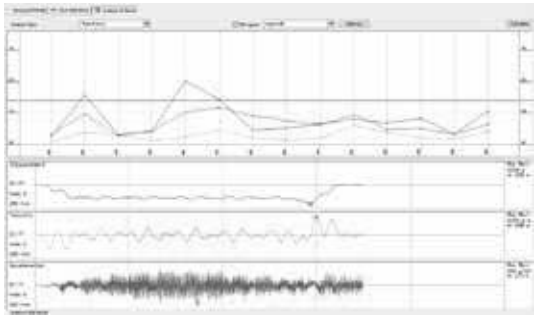
Vận tốc tính toán cho đoàn tàu: V = 250 km/h (khai thác 220 km/h, trường hợp 1) và V= 350 km/h (khai thác 320 km/h, trường hợp 2).

Trên cơ sở các đoàn tải trọng tàu hàng và tàu khách, sử dụng mô-đun Fast Rolling Stock để xác định các tham số chuyển vị và gia tốc. Để kết quả nghiên cứu thiên về bất lợi hơn so với đoàn tàu thực tế đã được B. Yan, G.-L. Dai and N. Hu công bố (2015) [8], trong nghiên cứu này sử dụng đoàn tàu HSLM-A [2].

2.2. Phân tích kết quả

2.2.1. Kết quả thu được khi sử dụng mô-đun "Fast Rolling Stock analysis"

2.2.1.1. Trường hợp 1: Tốc độ của đoàn tàu V=250 km/h



Hình 7. Biểu đồ chuyển vị, vận tốc, gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm với tốc độ đoàn tàu V= 250 km/h

Kết quả phân tích đáp ứng động lực của kết cấu cầu dưới tác dụng đoàn tàu cho thấy các đại lượng đặc trưng (chuyển vị, vận tốc, gia tốc) đều ổn định, không xuất hiện dấu hiệu bất lợi.

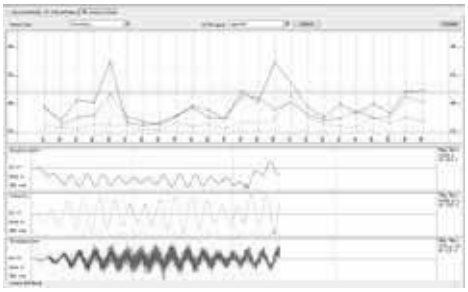
Chuyển vị cực đại đạt 0,003 m tại giây thứ 293; có dạng dao động điều hòa biên độ nhỏ, không tăng đột ngột theo thời gian. Điều này chứng tỏ độ cứng kết cấu đủ lớn để kiểm soát biến dạng dưới tải trọng động, đáp ứng yêu cầu trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) theo EN 1990.

Vận tốc cực đại đạt 0,020 m/s tại giây thứ 298, với dạng sóng gần điều hòa, phản ánh dao động tuyến tính. Không ghi nhận hiện tượng khuếch đại hay phi tuyến, cho thấy kết cấu làm việc trong miền đàn hồi, phù hợp với giả thiết phân tích động lực học tuyến tính và việc lựa chọn hợp lý các tham số động lực học.

Gia tốc cực đại đạt 2,54 m/s^2 tại giây thứ 173, giá trị này nằm trong giới hạn cho phép theo EN 1991-2, đảm bảo an toàn và độ êm thuận cho hành khách. Tuy nhiên, các điều kiện bất lợi như cộng hưởng cục bộ hay suy giảm độ cứng có thể làm gia tăng giá trị này và cần được nghiên cứu thêm.

Kết quả phân tích động lực học cho thấy các biên độ dao động ổn định, không xuất hiện cộng hưởng giữa tần số kích thích và tần số riêng. Do đó, ở vận tốc V = 250 km/h, kết cấu cầu đáp ứng tốt yêu cầu các trạng thái giới hạn và không phát sinh hiệu ứng động lực học bất lợi.

2.2.1.2. Trường hợp 2: Tốc độ của đoàn tàu V= 350 km/h



Hình 8. Biểu đồ chuyển vị, vận tốc, gia tốc thẳng đứng tại mặt cắt giữa dầm với tốc độ đoàn tàu V= 350 km/h

Kết quả phân tích đáp ứng động lực của kết cấu cầu dưới tác dụng của đoàn tàu với vận tốc V = 350 km/h cho thấy sự gia tăng rõ rệt của các đại lượng động lực học so với trường hợp vận tốc thấp hơn, đồng thời vẫn duy trì được trạng thái làm việc ổn định của hệ kết cấu.

Chuyển vị cực đại đạt 0,003 m tại giây thứ 213s, tương đương với trường hợp V = 250 km/h. Tuy nhiên, biên độ dao động có xu hướng tăng, phản ánh sự gia tăng ảnh hưởng của tải trọng động. Mặc dù vậy, giá trị tuyệt đối của chuyển vị vẫn nhỏ, khẳng định độ cứng tổng thể cao của kết cấu và khả năng kiểm soát biến dạng hiệu quả, đáp ứng yêu cầu của trạng thái giới hạn sử dụng theo EN 1990.

Vận tốc dao động cực đại đạt 0,038 m/s tại giây thứ 240s, xấp xỉ gấp đôi so với trường hợp vận tốc 250 km/h. Dạng sóng vận tốc thể hiện mức độ dao động lớn hơn và có dấu hiệu nhiễu loạn rõ rệt, cho thấy ảnh hưởng đáng kể của tải trọng động và tương tác đoàn tàu-cầu làm tăng khả năng xuất hiện các thành phần phi tuyến hoặc hiện tượng chồng chập của nhiều dao động.

Gia tốc cực đại đạt 3,70 m/s^2 tại giây thứ 131s, tăng khoảng 45% so với trường hợp V = 250 km/h và vượt nhẹ ngưỡng khuyến nghị 3,5 m/s^2 theo EN 1991-2. Điều này cho thấy, ở vận tốc khai thác cao, cần đặc biệt lưu ý đến các vấn đề liên quan đến sự thoải mái của hành khách và ổn định chạy tàu. Ngoài ra, sự xuất hiện của dao động mạnh với mật độ tần số cao có thể là dấu hiệu cho thấy tần số kích thích của đoàn tàu tiệm cận với một hoặc một số tần số riêng của kết cấu, dẫn đến hiện tượng khuếch đại cục bộ về gia tốc.

Từ các phân tích trên có thể nhận định rằng, ở vận tốc 350 km/h, kết cấu cầu vẫn đáp ứng yêu cầu về độ cứng và ổn định tổng thể, tuy nhiên các chỉ tiêu về gia tốc đã tiến gần hoặc vượt nhẹ giới hạn cho phép. Do đó, cần xem xét các giải pháp tối ưu hóa như tăng cường độ cứng, điều chỉnh tần số riêng hoặc bổ sung thiết bị giảm chấn nhằm cải thiện đáp ứng động lực, đặc biệt trong bối cảnh khai thác ở vận tốc siêu cao.

2.2.2. Phân tích kết quả

Khi khai thác tàu ĐSTĐC, đặc biệt là tàu khách, tiêu chí đánh giá an toàn và cảm giác dễ chịu của người ngồi trên tàu thông qua thông số động lực học gia tốc thẳng đứng của dầm, cụ thể tiêu chuẩn đánh giá độ võng, dao động cầu đường sắt được quy định trong Mục A2.4.4, tiêu chuẩn Eurocode 0, EN 1990:2002, Phụ lục A2 [9] : A2.4.4.2.1 - Gia tốc cực đại của dầm nhỏ hơn các giá trị sau:

Đường tàu chạy có đá ballast: γ_{bt} = 3,5 m/s^2;

Đường tàu chạy không có đá ballast: γ_{bt} = 5 m/s^2;

Theo tiêu chuẩn EN 1991-2, chuyển vị tối đa cho phép là L/800 [2].

Nghiên cứu sử dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" để xác định các thông số động lực học của cầu ĐSTĐC, từ đó định hình kết cấu, điều chỉnh mặt cắt ngang và chiều dài nhịp nhằm tránh cộng hưởng, đảm bảo yêu cầu thiết kế theo Eurocode [9] và phương pháp mô hình đã được V. Đ. Nguyễn và cộng sự nghiên cứu (2021) [10].

Giá trị chuyển vị cực đại của cả hai trường hợp đều có giá trị 0,003 m (3 mm), vẫn trong giới hạn cho phép. Theo tiêu chuẩn EN 1991-2 (2003) [2], chuyển vị tối đa cho phép là L/800=30.000/800=37,5 mm. Chuyển vị 3 mm này thấp hơn rất nhiều so với giá trị giới hạn [7], cho thấy cầu có độ cứng đáp ứng yêu cầu và ít biến dạng do đoàn tàu gây ra. Khi vận tốc tăng từ 250 lên 350 km/h, vận tốc cực đại tăng từ 0,020 lên 0,038 m/s (tăng 90%), trong khi chuyển vị gần như không đổi nhưng biên độ dao động tăng rõ rệt, phản ánh sự gia tăng hệ số khuếch đại động (dynamic amplification factor - DAF). Điều này cho thấy ảnh hưởng của tải trọng động trở nên chi phối hơn ở vận tốc cao, dù vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được.

Gia tốc cực đại của kết cấu ghi nhận sự gia tăng đáng kể, từ 2,54 m/s^2 ở vận tốc 250 km/h lên 3,70 m/s^2 ở vận tốc 350 km/h,

tương ứng với mức tăng khoảng 45%. Sự gia tăng này có ý nghĩa quan trọng về mặt khai thác, do gia tốc là thông số trực tiếp chi phối mức độ thoải mái của hành khách cũng như ảnh hưởng đến ổn định động lực của hệ đoàn tàu-cầu.

Đáng chú ý, giá trị gia tốc 3,70 m/s^2 đã vượt ngưỡng khuyến nghị 3,5 m/s^2 đối với gia tốc thẳng đứng của cầu đường sắt theo EN 1991-2. Việc vượt ngưỡng này cho thấy kết cấu bắt đầu tiến vào vùng nhạy cảm về mặt động lực học, nơi các hiệu ứng khuếch đại động có thể trở nên đáng kể và ảnh hưởng bất lợi đến điều kiện khai thác.

Từ góc độ cơ học, sự gia tăng mạnh của gia tốc là dấu hiệu cho thấy khả năng tiệm cận giữa tần số kích thích của tải trọng di động và một hoặc một số tần số riêng của kết cấu (resonance proximity). Mặc dù chưa xuất hiện cộng hưởng toàn phần, sự tiệm cận này có thể gây ra khuếch đại cục bộ của đáp ứng gia tốc, đặc biệt trong các hệ có hệ số cản thấp như cầu bê tông dự ứng lực hoặc kết cấu nhịp lớn. Do đó, gia tốc có xu hướng tăng nhanh hơn so với chuyển vị khi vận tốc đoàn tàu tăng.

Do đó, kết quả này cho thấy sự cần thiết phải xem xét tối ưu hóa thiết kế kết cấu trong trường hợp vận tốc khai thác cao (V = 350 km/h). Các giải pháp có thể bao gồm điều chỉnh tần số riêng của kết cấu để tránh vùng kích thích nguy hiểm, tăng cường hệ số cản thông qua các thiết bị giảm chấn hoặc cải thiện độ cứng tổng thể nhằm hạn chế hiệu ứng khuếch đại động. Những biện pháp này đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo cầu đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về an toàn, độ bền và sự thoải mái theo các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành.

Việc ứng dụng mô-đun RM Bridge "Fast Rolling Stock" trong phân tích động lực học cầu ĐSTĐC cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc mô phỏng tương tác đoàn tàu-kết cấu. Kết quả thu được chỉ ra rằng mô hình kết cấu có độ cứng tổng thể cao, thể hiện qua giá trị chuyển vị nhỏ và khả năng chịu tải tốt, nhờ sử dụng bê tông cường độ (f'_c 45MPa) kết hợp với hệ thống cáp dự ứng lực. Ở cả hai trường hợp vận tốc V = 250 km/h và V = 350 km/h, các biểu đồ đáp ứng (chuyển vị, vận tốc và gia tốc) đều thể hiện dạng dao động điều hòa ổn định, với biên độ phân bố đều theo thời gian và không xuất hiện xu hướng tăng dần hoặc đột biến. Điều này cho thấy hệ kết cấu làm việc trong miền ổn định động lực và không xảy ra hiện tượng cộng hưởng, phù hợp với các yêu cầu thiết kế trong EN 1990 và EN 1991-2.

Qua các kết quả phân tích sử dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" cho thấy ưu thế đáng kể về hiệu quả tính toán và tính thực tiễn trong các bài toán phân tích cầu ĐSTĐC. Nhờ được phát triển chuyên biệt cho bài toán tương tác tàu-cầu, mô-đun này tích hợp sẵn các mô hình tải trọng di động và đặc trưng động lực học của đoàn tàu, cho phép rút ngắn đáng kể thời gian thiết lập và xử lý bài toán. So với các phần mềm phân tích tổng quát như Abaqus hoặc SAP2000, vốn yêu cầu xây dựng mô hình phần tử hữu hạn phức tạp và thiết lập tương tác phi tuyến chi tiết, thời gian tính toán có thể giảm đáng kể, đồng thời hạn chế phụ thuộc vào kinh nghiệm chuyên sâu của người sử dụng. Điều này mang lại lợi thế kinh tế rõ rệt trong các dự án yêu cầu phân tích nhanh nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy cao.

Độ tin cậy của mô hình được củng cố thông qua sự phù hợp với các xu hướng đáp ứng động lực học đã được công bố trong tài liệu khoa học. Cụ thể, kết quả mô phỏng cho thấy sự tương đồng với nghiên cứu của H. Xia and N. Zhang (2005) [5], trong đó sai lệch giữa mô hình số và thực nghiệm thường nhỏ hơn 5% đối với kết cấu dầm hộp nhịp giản đơn. Điều này cho thấy mô-đun "Fast Rolling Stock" có khả năng tái hiện chính xác các đặc trưng dao động của cầu dưới tác dụng của tải trọng đoàn tàu với các vận tốc khác nhau.

Tuy nhiên, trong bối cảnh vận tốc khai thác cao (đặc biệt ở V = 350 km/h), các kết quả phân tích cũng cho thấy xu hướng gia tăng đáng kể của các đại lượng động lực học, đặc biệt là gia tốc. Do đó, việc tối ưu hóa thiết kế kết cấu là cần thiết nhằm kiểm soát hiệu ứng khuếch đại động và đảm bảo các tiêu chí về độ bền cũng như sự thoải mái của hành khách. Các giải pháp kỹ thuật có thể được xem xét bao gồm:

- Tăng chiều cao dầm (ví dụ từ 3,0 m lên khoảng 3,5 - 4,0 m) nhằm nâng cao độ cứng uốn và giảm biên độ dao động;
- Tăng số lượng bó cáp dự ứng lực (từ 10 lên 12 bó) để cải thiện khả năng chịu lực và kiểm soát biến dạng;
- Bổ sung các thiết bị giảm chấn như Tuned Mass Damper (TMD) nhằm tiêu tán năng lượng dao động và hạn chế gia tốc đỉnh.

Kết quả nghiên cứu không chỉ khẳng định tính hiệu quả của công cụ mô phỏng chuyên dụng mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn và tối ưu hóa giải pháp thiết kế cầu ĐSTĐC trong điều kiện vận tốc khai thác ngày càng lớn.

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ứng dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" của phần mềm RM Bridge cho thấy khả năng tính toán động lực học cầu ĐSTĐC thuận tiện, chính xác và độ tin cậy cao.

Các kết quả phân tích cho thấy cầu dạng dầm hộp nhịp 30 m đáp ứng tốt các tiêu chuẩn thiết kế, với chuyển vị, vận tốc và gia tốc đều nằm trong giới hạn an toàn.

Với vận tốc 350 km/h, gia tốc cực đại của cầu tiệm cận giới hạn cho phép, điều này nhấn mạnh sự cần thiết phải tối ưu hóa thiết kế để đảm bảo cho hành khác có cảm giác thoải mái và tuổi thọ công trình.

Kết cấu sử dụng bê tông có cường độ chịu nén đặc trưng f'_c = 45 MPa và cáp dự ứng lực mang lại độ cứng cao, khả năng chống chịu tốt trước tải trọng động lực học của đoàn tàu.

Nghiên cứu này là tiền đề cho việc áp dụng mô-đun "Fast Rolling Stock" để thiết kế tối ưu trong dự án ĐSTĐC Bắc - Nam, nhằm đảm bảo tính kinh tế và kỹ thuật trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Luật Đường sắt số 06/2017/QH14, ngày 04/7/2017.

[2] European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges (EN 1991-2:2003).

[3] Hòa P. D., Hùng T. V., Thắng P. B. và Hằng N. T. N. Nghiên cứu phân tích động lực học của kết cấu cầu đường sắt cao tốc. Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng (KHCNXD - ĐHXDHN), tập 15, số 7V, tr. 1-12, 11/2021.

[4] S. H. Ju and H. T. Lin. Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges. Journal of Sound and Vibration, vol. 267, no. 5, pp. 1127-1141, Nov. 2003.

[5] H. Xia and N. Zhang. Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains. Computers & Structures, vol. 83, no. 23-24, pp. 1891-1901, Sep. 2005.

[6] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi dự án ĐSTĐC trên trục Bắc - Nam, 2024.

[7] Bộ Giao thông vận tải. TCVN 13594-1:2022. Thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc 350 km/h - Phần 1: Yêu cầu chung.

[8] B. Yan, G.-L. Dai and N. Hu. Recent development of design and construction of short span high-speed railway bridges in China. Engineering Structures, vol. 100, pp. 707-717, Oct. 2015.

[9] European Committee for Standardization. Eurocode 0: Basis of structural design (EN 1990:2002).

[10] V. Đ. Nguyễn and K. Le-Nguyen. Phân tích động lực học đường sắt cao tốc theo phương pháp khai triển tác động cộng hưởng. Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 7, 2021.

■Ngày nhận bài: 31/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Xu hướng xây dựng thành phố thông minh bền vững: Tiếp cận tích hợp kinh tế - môi trường - xã hội và đánh giá vòng đời (LCA)

Emerging trends in smart sustainable City development: Integrating Economic, Environmental, and Social Dimensions with Life Cycle Assessment (LCA)

> TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO
Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: thaonp@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và các thách thức gia tăng về môi trường, kinh tế và xã hội, mô hình thành phố thông minh được xem là một hướng tiếp cận quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả quản lý đô thị. Tuy nhiên, các cách tiếp cận truyền thống còn thiên về công nghệ và chưa gắn kết chặt chẽ với mục tiêu phát triển bền vững. Nghiên cứu này nhằm làm rõ xu hướng phát triển thành phố thông minh theo hướng bền vững, phân tích mối quan hệ giữa ba trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội, đồng thời đề xuất khung tiếp cận tích hợp trong phát triển đô thị. Phương pháp nghiên cứu được thực hiện thông qua tổng quan tài liệu, phân tích - tổng hợp và xây dựng khung lý thuyết. Kết quả cho thấy xu hướng chuyển dịch từ mô hình thành phố thông minh định hướng công nghệ sang thành phố thông minh bền vững, trong đó công nghệ đóng vai trò công cụ hỗ trợ nhằm đạt được các mục tiêu phát triển toàn diện. Nghiên cứu đồng thời nhấn mạnh vai trò của các công cụ đánh giá vòng đời, bao gồm LCA, LCC và Social LCA, trong việc đánh giá toàn diện các tác động của các giải pháp thành phố thông minh. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất khung tiếp cận tích hợp kết hợp giữa công nghệ, mục tiêu phát triển bền vững và các công cụ đánh giá vòng đời, nhằm hỗ trợ ra quyết định trong quy hoạch và phát triển đô thị. Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở lý luận và cung cấp định hướng thực tiễn cho phát triển thành phố thông minh bền vững.

Từ khoá: Thành phố thông minh bền vững; phát triển bền vững; đánh giá vòng đời; quy hoạch đô thị.

ABSTRACT

In the context of rapid urbanization and increasing environmental, economic, and social challenges, the smart city model has emerged as a key approach to enhancing urban management efficiency. However, conventional approaches remain largely technology-driven and are not sufficiently aligned with sustainable development objectives. This study aims to clarify the development trend toward smart sustainable cities, analyze the interrelationships among the economic, environmental, and social pillars, and propose an integrated framework for urban development. The research methodology is based on a literature review, analytical synthesis, and conceptual framework development. The results indicate a transition from technology-driven smart city models toward smart sustainable cities, in which technology serves as an enabling tool to achieve comprehensive development goals. The study also highlights the role of life cycle-based assessment tools, including Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), and Social Life Cycle Assessment (Social LCA), in comprehensively evaluating the impacts of smart urban solutions. Based on these findings, the paper proposes an integrated framework that combines technological systems, sustainability objectives, and life cycle assessment tools to support decision-making in urban planning and development. The study contributes to both theoretical advancement and practical guidance for the development of smart sustainable cities.

Keywords: Smart sustainable city; sustainable development; life cycle assessment; urban planning.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những thập kỷ gần đây, quá trình đô thị hóa diễn ra nhanh chóng, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển, đã tạo ra áp lực lớn lên hệ thống hạ tầng kỹ thuật và dịch vụ đô thị như giao thông, năng lượng, cấp thoát nước và quản lý chất thải. Đồng thời, các thách thức môi trường, bao gồm biến đổi khí hậu, ô nhiễm không khí và suy giảm tài nguyên, ngày càng gia tăng, đặt ra yêu cầu cấp thiết về một mô hình phát triển đô thị hiệu quả và bền vững.

Trong bối cảnh đó, mô hình thành phố thông minh được xem là một hướng tiếp cận quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả quản lý đô thị thông qua ứng dụng công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), Internet vạn vật (IoT) và dữ liệu lớn. Các hệ thống thông minh cho phép thu thập và phân tích dữ liệu theo thời gian thực, góp phần tối ưu hóa vận hành và nâng cao chất lượng dịch vụ đô thị. Tuy nhiên, các cách tiếp cận ban đầu chủ yếu mang tính định hướng công nghệ, tập trung vào triển khai các giải pháp kỹ thuật mà chưa xem xét đầy đủ các tác động dài hạn đến môi trường và xã hội, dẫn đến nguy cơ gia tăng tiêu thụ năng lượng, phát sinh chất thải điện tử và bất bình đẳng trong tiếp cận công nghệ.

Trước những hạn chế đó, xu hướng nghiên cứu hiện nay đã chuyển dịch từ cách tiếp cận xây dựng thành phố thông minh từ hướng tiếp cận công nghệ sang hướng tiếp cận bền vững, trong đó công nghệ được xem là công cụ hỗ trợ nhằm đạt được các mục tiêu phát triển bền vững. Theo định nghĩa của Ủy ban châu Âu, khái niệm đô thị thông minh được hiểu là nơi các mạng lưới và dịch vụ truyền thống được thực hiện hiệu quả hơn với việc sử dụng các công nghệ kỹ thuật số và viễn thông vì lợi ích của cư dân và doanh nghiệp; theo liên minh viễn thông thế giới (ITU- International Telecomunications Union) định nghĩa: "Thành phố thông minh bền vững là đô thị sáng tạo sử dụng công nghệ thông tin và truyền thông (CNTT-TT) và các phương tiện khác để cải thiện chất lượng cuộc sống, hiệu quả của hoạt động và dịch vụ đô thị và khả năng cạnh tranh, đồng thời đảm bảo đáp ứng nhu cầu của hiện tại và các thế hệ tương lai liên quan đến các khía cạnh kinh tế, xã hội, môi trường cũng như văn hóa" và theo Viện tiêu chuẩn Anh, thành phố thông minh là sự tích hợp hiệu quả sử dụng công nghệ thông tin và truyền thông (CNTT-TT) và các phương tiện khác để cải thiện chất lượng cuộc sống nhằm hướng tới một tương lai bền vững [1]. Các nghiên cứu ban đầu tập trung vào vai trò của ICT và IoT trong tối ưu hóa vận hành đô thị [3], [9], trong khi các nghiên cứu sau đó nhấn mạnh rằng thành phố thông minh là một hệ sinh thái phức hợp, trong đó con người và quản trị đóng vai trò trung tâm [6,2]. Đồng thời, các nghiên cứu gần đây cũng mở rộng theo hướng tích hợp các trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội, gắn với các giải pháp như lưới điện thông minh, quản lý năng lượng và giám sát môi trường thời gian thực [8], [5], cũng như các yếu tố xã hội như chất lượng sống và khả năng tiếp cận dịch vụ [10,4] và đảm bảo an toàn thông tin [7].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu đề cập đến thành phố thông minh và phát triển bền vững, vẫn tồn tại một khoảng trống nghiên cứu đáng kể. Cụ thể, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tiếp cận riêng rẽ giữa các yếu tố công nghệ và các mục tiêu phát triển bền vững, hoặc chỉ tập trung vào một khía cạnh riêng lẻ (kinh tế, môi trường hoặc xã hội), trong khi thiếu một khung tiếp cận tích hợp có khả năng đánh giá đồng thời các tác động trên toàn bộ vòng đời của các giải pháp đô thị. Đặc biệt, việc tích hợp các công cụ đánh giá vòng đời như Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC) và Social Life Cycle Assessment (Social LCA) trong quy hoạch và phát triển thành phố thông minh vẫn còn hạn chế, dẫn đến việc các quyết định đầu tư và lựa chọn công nghệ chưa phản ánh đầy đủ các chi phí và tác động dài hạn.

Nghiên cứu này đóng góp vào lĩnh vực thành phố thông minh bền vững ở ba khía cạnh chính. Thứ nhất, nghiên cứu hệ thống hóa xu hướng chuyển dịch từ mô hình thành phố thông minh định hướng công nghệ sang cách tiếp cận tích hợp dựa trên phát triển bền vững. Thứ hai, nghiên cứu làm rõ mối quan hệ tương tác giữa ba trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội trong bối cảnh ứng dụng công nghệ đô thị. Thứ ba, nghiên cứu đề xuất một khung tiếp cận tích hợp kết hợp các thành phần công nghệ với bộ công cụ đánh giá vòng đời (LCA, LCC và Social LCA), góp phần hỗ trợ ra quyết định dựa trên cách tiếp cận vòng đời.

Với các đóng góp trên, nghiên cứu không chỉ bổ sung cơ sở lý luận cho lĩnh vực thành phố thông minh bền vững mà còn cung cấp một cách tiếp cận có khả năng ứng dụng trong thực tiễn, đặc biệt trong bối cảnh các đô thị đang đối mặt với áp lực phát triển nhanh và yêu cầu chuyển đổi theo hướng bền vững.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cách tiếp cận nghiên cứu

Nghiên cứu này áp dụng cách tiếp cận liên ngành, kết hợp giữa lĩnh vực quy hoạch đô thị, khoa học môi trường và công nghệ thông tin nhằm phân tích xu hướng phát triển thành phố thông minh bền vững. Trọng tâm của nghiên cứu là làm rõ mối quan hệ giữa ba trụ cột của phát triển bền vững (kinh tế, môi trường và xã hội) trong bối cảnh ứng dụng công nghệ thông minh, đồng thời tích hợp phương pháp đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) như một công cụ hỗ trợ ra quyết định.

Phương pháp nghiên cứu chủ đạo là nghiên cứu định tính, thông qua tổng hợp và phân tích tài liệu khoa học, kết hợp với cách tiếp cận khung tiếp cận nhằm đề xuất một mô hình tích hợp giữa thành phố thông minh và phát triển bền vững.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu có hệ thống kết hợp với phân tích và tổng hợp nhằm xây dựng khung tiếp cận tích hợp cho phát triển thành phố thông minh bền vững. Cách tiếp cận này cho phép nhận diện các xu hướng nghiên cứu chính, làm rõ khoảng trống nghiên cứu và đề xuất một mô hình lý thuyết có cơ sở khoa học.

Quá trình sàng lọc tài liệu được thực hiện theo các tiêu chí lựa chọn cụ thể nhằm đảm bảo tính phù hợp và chất lượng khoa học của các nghiên cứu được đưa vào phân tích. Cụ thể, các tài liệu được lựa chọn chủ yếu là các bài báo khoa học công bố trong giai đoạn từ năm 2010 đến năm 2024, phản ánh các xu hướng nghiên cứu hiện đại về thành phố thông minh và phát triển bền vững. Các nghiên cứu được ưu tiên bao gồm các công trình có liên quan trực tiếp đến việc tích hợp công nghệ đô thị với các mục tiêu phát triển bền vững hoặc có áp dụng các công cụ đánh giá vòng đời.

Sau khi sàng lọc, các tài liệu được phân tích và phân loại theo các nhóm nội dung chính, bao gồm: (i) các nghiên cứu về khái niệm và mô hình thành phố thông minh; (ii) các nghiên cứu về tích hợp các trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội trong phát triển đô thị; và (iii) các nghiên cứu về ứng dụng các công cụ đánh giá vòng đời như LCA, LCC và Social LCA. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành tổng hợp và so sánh các cách tiếp cận khác nhau nhằm làm rõ xu hướng phát triển và xác định khoảng trống nghiên cứu.

Dựa trên kết quả tổng quan tài liệu, phương pháp phân tích tổng hợp được sử dụng để xây dựng khung tiếp cận tích hợp. Khung này được phát triển dựa trên việc kết nối ba thành phần chính, bao gồm các công nghệ đô thị (ICT, IoT và hệ thống dữ liệu), các mục tiêu phát triển bền vững (kinh tế, môi trường và xã hội) và bộ công cụ đánh giá vòng đời (LCA, LCC và Social LCA). Đồng thời, nghiên cứu cũng áp dụng phương pháp phân tích trường hợp minh họa đối

với hệ thống giao thông thông minh nhằm kiểm chứng tính khả thi và khả năng ứng dụng của khung đề xuất.

Thông qua việc kết hợp giữa tổng quan tài liệu có hệ thống, phân tích tổng hợp và minh họa thực tiễn, phương pháp nghiên cứu này đảm bảo tính logic, nhất quán và độ tin cậy của kết quả nghiên cứu, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp phát triển thành phố thông minh theo hướng bền vững.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Xu hướng chuyển dịch sang thành phố thông minh bền vững

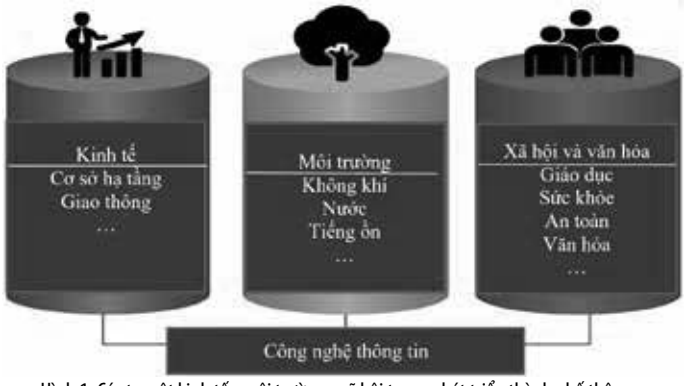
Kết quả tổng quan tài liệu cho thấy một xu hướng rõ rệt trong cả nghiên cứu và thực tiễn là sự chuyển dịch từ mô hình "thành phố thông minh dựa trên công nghệ" sang "thành phố thông minh bền vững". Trong giai đoạn đầu, các sáng kiến thành phố thông minh chủ yếu tập trung vào việc ứng dụng công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), Internet vạn vật (IoT) và dữ liệu lớn nhằm tối ưu hóa vận hành đô thị. Tuy nhiên, cách tiếp cận này bộc lộ một số hạn chế khi chưa xem xét đầy đủ các tác động dài hạn đối với môi trường và xã hội.

Các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh rằng công nghệ chỉ đóng vai trò là công cụ hỗ trợ, trong khi mục tiêu cốt lõi của thành phố thông minh là hướng tới phát triển bền vững, bao gồm giảm phát thải khí nhà kính, sử dụng hiệu quả tài nguyên, nâng cao chất lượng sống và đảm bảo công bằng xã hội. Điều này phản ánh sự chuyển dịch trong tư duy phát triển đô thị, từ tối ưu hóa kỹ thuật sang tối ưu hóa giá trị tổng thể.

Nhìn chung, kết quả phân tích cho thấy xu hướng phát triển thành phố thông minh đang dịch chuyển từ tiếp cận thuần công nghệ sang tiếp cận tích hợp hướng tới phát triển bền vững.

3.2. Mối quan hệ giữa kinh tế - môi trường - xã hội trong thành phố thông minh

Đánh giá thành phố thông minh bền vững dựa trên chỉ số KPIs, với 3 lĩnh vực trọng tâm chính: kinh tế - môi trường - xã hội và văn hóa. Ba trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội có mối quan hệ chặt chẽ, tương tác đa chiều trong quá trình phát triển thành phố thông minh (Hình 1)



Hình 1. Các trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội trong phát triển thành phố thông minh bền vững

Về khía cạnh kinh tế, việc triển khai các giải pháp thông minh như giao thông thông minh, năng lượng thông minh và quản lý đô thị số có thể nâng cao hiệu quả sử dụng nguồn lực, giảm chi phí vận hành và tạo ra các cơ hội kinh tế mới, đặc biệt trong các lĩnh vực đổi mới sáng tạo và kinh tế số. Đồng thời, các thành phố thông minh có xu hướng thu hút nguồn nhân lực chất lượng cao và đầu tư quốc tế.

Về khía cạnh môi trường, các công nghệ thông minh góp phần quan trọng trong việc giảm phát thải CO_2, tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và nâng cao hiệu quả quản lý tài nguyên. Ví dụ, hệ thống lưới điện thông minh cho phép cân bằng cung - cầu năng lượng, trong khi các hệ thống giám sát môi trường hỗ trợ phát hiện và kiểm soát ô nhiễm.

Về khía cạnh xã hội, thành phố thông minh tạo điều kiện cải thiện chất lượng sống thông qua các dịch vụ công thông minh như y tế điện tử, giáo dục trực tuyến và quản trị đô thị minh bạch. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng nếu không được thiết kế phù hợp, các giải pháp công nghệ có thể làm gia tăng bất bình đẳng xã hội, đặc biệt liên quan đến khả năng tiếp cận công nghệ và dữ liệu.

Đáng chú ý, phân tích tương tác cho thấy tồn tại đồng thời cả tính bổ trợ và tính đánh đổi giữa ba trụ cột. Chẳng hạn, việc đầu tư vào công nghệ xanh có thể mang lại lợi ích môi trường lâu dài nhưng đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu cao. Ngược lại, việc tối ưu hóa kinh tế ngắn hạn có thể dẫn đến suy giảm chất lượng môi trường nếu không có các cơ chế kiểm soát phù hợp. Điều này cho thấy việc tối ưu hóa một trụ cột đơn lẻ có thể dẫn đến các tác động tiêu cực đối với các trụ cột còn lại và cho thấy sự cần thiết của một cách tiếp cận tích hợp nhằm tránh xung đột giữa các mục tiêu phát triển. Do đó, cách tiếp cận tích hợp và cân bằng là yêu cầu then chốt trong phát triển thành phố thông minh bền vững.

3.3. Vai trò của đánh giá vòng đời trong xây dựng thành phố thông minh

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tích hợp đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) là một yêu cầu quan trọng nhằm bảo đảm tính bền vững môi trường của các giải pháp trong phát triển thành phố thông minh. Khác với các phương pháp đánh giá truyền thống thường tập trung vào giai đoạn vận hành, LCA cho phép xem xét toàn diện các tác động môi trường trong suốt vòng đời của hệ thống, bao gồm các giai đoạn: khai thác nguyên liệu, sản xuất, xây dựng, vận hành và kết thúc vòng đời.

3.3.1. Quy trình đánh giá vòng đời (LCA)

Quy trình LCA trong nghiên cứu này được xem xét theo các bước tiêu chuẩn sau:

(i) Xác định mục tiêu và phạm vi

Bước này nhằm xác định rõ mục tiêu nghiên cứu, đối tượng đánh giá và phạm vi hệ thống. Các nội dung chính bao gồm: xác định đơn vị chức năng, thiết lập ranh giới hệ thống và lựa chọn các chỉ tiêu môi trường cần đánh giá. Việc xác định chính xác mục tiêu và phạm vi là cơ sở để đảm bảo tính nhất quán và độ tin cậy của kết quả phân tích.

(ii) Kiểm kê vòng đời (Life Cycle Inventory - LCI)

Đây là bước thu thập và lượng hóa các dòng đầu vào và đầu ra của hệ thống trong toàn bộ vòng đời, bao gồm nguyên vật liệu, năng lượng tiêu thụ và các dạng phát thải ra môi trường. Trong bối cảnh thành phố thông minh, dữ liệu LCI liên quan đến hạ tầng kỹ thuật, thiết bị công nghệ (ICT, IoT) và hoạt động vận hành đô thị. Việc thu thập dữ liệu đầy đủ và chính xác là thách thức lớn, đặc biệt đối với các hệ thống có quy mô lớn và tính phức tạp cao.

(iii) Đánh giá tác động vòng đời (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)

Ở bước này, các dữ liệu kiểm kê được chuyển đổi thành các chỉ số tác động môi trường thông qua các phương pháp đánh giá phù hợp. Các nhóm tác động thường được xem xét bao gồm: biến đổi khí hậu (phát thải CO_2 tương đương), suy giảm tài nguyên, axit hóa, phú dưỡng và độc tính môi trường. Kết quả LCIA giúp xác định các điểm phát sinh tác động lớn trong vòng đời, từ đó hỗ trợ đề xuất các giải pháp giảm thiểu.

(iv) Diễn giải kết quả

Bước diễn giải nhằm tổng hợp, phân tích và đánh giá kết quả LCA để đưa ra các kết luận và khuyến nghị. Trong phát triển thành phố

thông minh, kết quả LCA được sử dụng để so sánh các phương án công nghệ, hỗ trợ lựa chọn giải pháp tối ưu và nâng cao hiệu quả quản lý môi trường đô thị.

3.3.2. Đánh giá chi phí vòng đời Life Cycle Costing (LCC)

Bên cạnh LCA, đánh giá chi phí vòng đời (LCC) là công cụ quan trọng để phân tích hiệu quả kinh tế dài hạn của các giải pháp thành phố thông minh. Phương pháp này xem xét toàn bộ chi phí phát sinh trong suốt vòng đời của hệ thống, bao gồm chi phí đầu tư ban đầu, chi phí vận hành - bảo trì, chi phí thay thế và chi phí xử lý cuối vòng đời.

Kết quả phân tích cho thấy nhiều giải pháp công nghệ thông minh có chi phí đầu tư ban đầu cao, nhưng mang lại lợi ích kinh tế đáng kể trong dài hạn thông qua việc tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí vận hành và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên. Do đó, LCC góp phần khắc phục hạn chế của cách tiếp cận truyền thống chỉ tập trung vào chi phí ban đầu, đồng thời hỗ trợ ra quyết định theo hướng tối ưu hóa chi phí tổng thể trong suốt vòng đời dự án.

3.3.3. Đánh giá vòng đời xã hội (Social LCA)

Đánh giá vòng đời xã hội (Social LCA) là công cụ nhằm phân tích các tác động xã hội của các giải pháp thành phố thông minh. Nội dung đánh giá bao gồm các khía cạnh như: tạo việc làm, điều kiện lao động, sức khỏe cộng đồng, mức độ tiếp cận dịch vụ và công bằng xã hội.

Trong bối cảnh ứng dụng công nghệ số, Social LCA còn xem xét các vấn đề liên quan đến quyền riêng tư, bảo mật dữ liệu và khả năng tiếp cận công nghệ của các nhóm dân cư khác nhau. Kết quả phân tích cho thấy, nếu không được quản lý phù hợp, các giải pháp thông minh có thể làm gia tăng bất bình đẳng xã hội, đặc biệt đối với các nhóm yếu thế có hạn chế về khả năng tiếp cận công nghệ.

Do đó, việc áp dụng Social LCA góp phần bảo đảm rằng các giải pháp thành phố thông minh không chỉ hiệu quả về mặt kỹ thuật mà còn hướng tới tính bao trùm và công bằng xã hội.

3.3.4. Tích hợp LCA - LCC - Social LCA trong phát triển thành phố thông minh

Việc tích hợp các công cụ LCA, LCC và Social LCA cho phép đánh giá toàn diện các giải pháp thành phố thông minh trên cả ba phương diện: môi trường, kinh tế và xã hội. Cách tiếp cận này giúp tránh các quyết định phiến diện, đồng thời hỗ trợ lựa chọn các phương án tối ưu theo hướng phát triển bền vững. Khi triển khai phát triển thành phố thông minh bền vững, thiết kế vòng đời dự án cần quan tâm đến các hoạt động tái chế, tái tạo, hiệu quả, an toàn và xã hội.

LCA không chỉ là công cụ đánh giá mà còn là cơ sở khoa học quan trọng để định hướng lựa chọn giải pháp trong phát triển thành phố thông minh bền vững.

Tuy nhiên, việc triển khai tích hợp còn gặp nhiều khó khăn như thiếu dữ liệu, hạn chế về phương pháp luận và khó khăn trong việc lượng hóa các tác động xã hội. Do đó, cần tiếp tục hoàn thiện các công cụ đánh giá và xây dựng cơ sở dữ liệu phục vụ cho quá trình phân tích, nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng trong thực tiễn phát triển thành phố thông minh bền vững. Điều này khẳng định LCA là công cụ nền tảng trong việc định hướng các giải pháp thành phố thông minh theo hướng bền vững.

3.4. Minh họa áp dụng khung tiếp cận tích hợp: Trường hợp hệ thống giao thông thông minh

Để làm rõ tính khả thi và giá trị ứng dụng của khung tiếp cận tích hợp được đề xuất, nghiên cứu tiến hành phân tích minh họa đối với hệ thống giao thông thông minh, một trong những lĩnh vực cốt lõi của thành phố thông minh với mức độ ứng dụng công nghệ cao và có tác động trực tiếp đến cả ba trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội. Hệ thống này bao gồm các thành phần chính như điều khiển giao thông thích ứng, cảm biến và camera giám sát, nền tảng dữ liệu giao thông thời gian thực và các ứng dụng hỗ trợ người dùng, cho phép thu thập, phân tích và tối ưu hóa luồng giao thông đô thị. Phạm vi phân tích được thiết lập theo cách tiếp cận vòng đời, bao gồm các giai đoạn từ sản xuất và lắp đặt thiết bị, vận hành và bảo trì, đến kết thúc vòng đời thông qua tái chế hoặc thải bỏ.

Kết quả phân tích cho thấy hệ thống giao thông thông minh mang lại những lợi ích đáng kể trên cả ba phương diện của phát triển bền vững. Về khía cạnh kinh tế, việc tối ưu hóa tín hiệu giao thông và quản lý lưu lượng phương tiện giúp giảm thời gian di chuyển, tiết kiệm nhiên liệu và giảm chi phí do ùn tắc, qua đó nâng cao hiệu quả vận hành và thúc đẩy hoạt động kinh tế đô thị. Về khía cạnh môi trường, hệ thống góp phần giảm phát thải khí nhà kính và cải thiện chất lượng không khí thông qua việc giảm tiêu thụ nhiên liệu và hạn chế tình trạng ùn tắc kéo dài; tuy nhiên, các tác động môi trường phát sinh từ quá trình sản xuất thiết bị và tiêu thụ năng lượng trong vận hành cũng cần được xem xét một cách đầy đủ trong toàn bộ vòng đời. Về khía cạnh xã hội, hệ thống giúp nâng cao an toàn giao thông, giảm tai nạn và cải thiện chất lượng dịch vụ đô thị, đồng thời đặt ra các thách thức liên quan đến quyền riêng tư dữ liệu và sự chênh lệch trong khả năng tiếp cận công nghệ giữa các nhóm dân cư.

Trên cơ sở đó, việc áp dụng bộ công cụ đánh giá vòng đời bao gồm Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC) và Social Life Cycle Assessment (Social LCA) cho phép phân tích toàn diện các tác động của hệ thống. Kết quả LCA chỉ ra rằng phần lớn tác động môi trường tập trung ở giai đoạn sản xuất thiết bị và tiêu thụ năng lượng trong quá trình vận hành, trong khi các lợi ích môi trường đạt được trong giai đoạn sử dụng có thể bù đắp đáng kể các tác động ban đầu nếu xét trong dài hạn. Phân tích LCC cho thấy mặc dù chi phí đầu tư ban đầu tương đối cao, tổng chi phí vòng đời có xu hướng giảm nhờ tiết kiệm chi phí vận hành và giảm thiệt hại do ùn tắc giao thông, qua đó khẳng định hiệu quả kinh tế của giải pháp trong dài hạn. Đồng thời, phân tích Social LCA cho thấy hệ thống mang lại nhiều lợi ích xã hội như cải thiện an toàn và chất lượng sống, song cũng nhấn mạnh sự cần thiết của các cơ chế quản lý nhằm đảm bảo công bằng trong tiếp cận công nghệ và bảo vệ dữ liệu cá nhân.

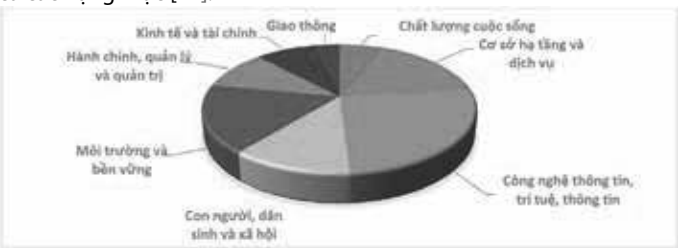
Việc tích hợp các kết quả từ LCA, LCC và Social LCA cho phép nhận diện rõ các mối quan hệ tương tác giữa các trụ cột phát triển bền vững, trong đó tồn tại đồng thời các yếu tố bổ trợ và đánh đổi. Chẳng hạn, lợi ích môi trường và xã hội đạt được thông qua giảm phát thải và nâng cao an toàn giao thông có thể đi kèm với chi phí đầu tư ban đầu cao, trong khi việc mở rộng hệ thống công nghệ có thể làm gia tăng rủi ro liên quan đến bảo mật dữ liệu. Do đó, cách tiếp cận tích hợp đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ so sánh các phương án công nghệ và lựa chọn giải pháp tối ưu dựa trên tiêu chí đa mục tiêu, thay vì chỉ tập trung vào một khía cạnh riêng lẻ.

Kết quả minh họa này cho thấy khung tiếp cận tích hợp được đề xuất có khả năng kết nối hiệu quả giữa các thành phần công nghệ, các mục tiêu phát triển bền vững và các công cụ đánh giá vòng đời, qua đó hỗ trợ quá trình ra quyết định trong quy hoạch và phát triển đô thị theo hướng bền vững. Điều này khẳng định rằng việc tích hợp LCA, LCC và Social LCA không chỉ nâng cao tính toàn diện trong đánh giá mà còn góp phần tăng cường cơ sở khoa học và tính minh bạch trong lựa chọn và triển khai các giải pháp thành phố thông minh.

3.5. Đánh giá thực tiễn và khoảng trống triển khai

Các hạng mục quan tâm chính của thành phố thông minh bền vững bao gồm: Công nghệ thông tin, trí tuệ, thông tin; Cơ sở hạ tầng và dịch vụ; Môi trường và bền vững; Con người, dân sinh và xã hội; Hành chính, quản lý và quản trị; Chất lượng cuộc sống; Kinh tế và tài

chính; Giao thông. Phân tích các trường hợp điển hình trên thế giới cho thấy nhiều thành phố đã đạt được những thành tựu đáng kể trong một số lĩnh vực như giao thông thông minh, năng lượng tái tạo và quản lý đô thị. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng chưa có thành phố nào đạt được sự "thông minh toàn diện" trên tất cả các hạng mục [11].



Hình 2. Các hạng mục quan tâm chính của thành phố thông minh bền vững (Liên minh viễn thông thế giới ITU)

Một trong những nguyên nhân chính là sự thiếu tích hợp giữa các lĩnh vực và giữa các mục tiêu phát triển. Nhiều dự án vẫn được triển khai theo cách tiếp cận phân mảnh, tập trung vào từng lĩnh vực riêng lẻ mà chưa có sự liên kết tổng thể. Ngoài ra, việc áp dụng LCA trong quy hoạch và quản lý đô thị vẫn còn hạn chế, chủ yếu do thiếu dữ liệu, năng lực kỹ thuật và khung chính sách hỗ trợ.

Các thách thức khác bao gồm chi phí đầu tư cao, rủi ro công nghệ, vấn đề bảo mật dữ liệu và sự thiếu hụt cơ chế hợp tác hiệu quả giữa khu vực công và tư. Điều này cho thấy việc phát triển thành phố thông minh bền vững không chỉ là vấn đề công nghệ, mà còn là vấn đề thể chế và quản trị.

3.6. Đề xuất khung tiếp cận tích hợp

Trên cơ sở các kết quả phân tích, nghiên cứu đề xuất một khung tiếp cận tích hợp nhằm định hướng phát triển thành phố thông minh theo hướng bền vững, trong đó nhấn mạnh sự kết hợp chặt chẽ giữa công nghệ, mục tiêu phát triển bền vững và các công cụ đánh giá vòng đời (Hình 3). Khung tiếp cận này góp phần khắc phục những hạn chế của các mô hình phát triển thành phố thông minh truyền thống, vốn chủ yếu tập trung vào yếu tố công nghệ mà chưa xem xét đầy đủ các tác động môi trường và xã hội trong dài hạn.

3.6.1. Nguyên tắc xây dựng khung tiếp cận

Khung tiếp cận được xây dựng dựa trên một số nguyên tắc cơ bản. Trước hết, phát triển bền vững được xác định là mục tiêu trung tâm, trong đó các giải pháp thành phố thông minh cần hướng tới sự cân bằng giữa ba trụ cột kinh tế, môi trường và xã hội, thay vì chỉ tập trung vào hiệu quả công nghệ hoặc tăng trưởng kinh tế ngắn hạn. Bên cạnh đó, cách tiếp cận lấy con người làm trung tâm được nhấn mạnh, với mục tiêu nâng cao chất lượng sống, đảm bảo công bằng xã hội và tăng cường khả năng tiếp cận các dịch vụ đô thị, đặc biệt đối với các nhóm dân cư dễ bị tổn thương.

Ngoài ra, nguyên tắc phòng ngừa và giảm thiểu ô nhiễm môi trường cần được ưu tiên thông qua việc lựa chọn và triển khai các giải pháp công nghệ dựa trên khả năng giảm phát thải, sử dụng hiệu quả tài nguyên và hạn chế các tác động tiêu cực đến môi trường. Cuối cùng, cách tiếp cận vòng đời và dài hạn đóng vai trò quan trọng, theo đó các quyết định cần dựa trên đánh giá toàn diện trong suốt vòng đời của hệ thống, nhằm tránh các giải pháp chỉ tối ưu trong ngắn hạn nhưng gây ra hệ quả bất lợi trong dài hạn.

3.6.2. Cấu trúc khung tiếp cận tích hợp

Khung tiếp cận tích hợp được đề xuất bao gồm ba hợp phần chính có mối quan hệ tương tác chặt chẽ. Thứ nhất là hợp phần công nghệ và hạ tầng thông minh, bao gồm các nền tảng công nghệ như công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), Internet vạn vật (IoT), dữ liệu lớn và các hệ thống hạ tầng thành phố thông minh như giao thông, năng lượng, cấp thoát nước và quản lý chất thải. Đây là nền tảng kỹ thuật phục vụ cho việc thu thập, phân tích dữ liệu và hỗ trợ ra quyết định.

Thứ hai là hợp phần mục tiêu phát triển bền vững, được cấu thành từ ba trụ cột chính. Trong đó, trụ cột kinh tế hướng tới nâng cao hiệu quả đầu tư, tối ưu hóa chi phí và thúc đẩy đổi mới sáng tạo; trụ cột môi trường tập trung vào giảm phát thải, tiết kiệm tài nguyên và kiểm soát ô nhiễm; và trụ cột xã hội nhằm nâng cao chất lượng sống, tạo việc làm, đảm bảo công bằng và tăng cường khả năng tiếp cận dịch vụ đô thị.

Thứ ba là hợp phần công cụ đánh giá và hỗ trợ ra quyết định, bao gồm đánh giá vòng đời (LCA) để phân tích các tác động môi trường, đánh giá chi phí vòng đời (LCC) nhằm đánh giá hiệu quả kinh tế dài hạn và đánh giá vòng đời xã hội (Social LCA) để xem xét các tác động xã hội. Ba hợp phần này được liên kết thông qua hệ thống dữ liệu và cơ chế quản trị đô thị, tạo thành một hệ thống tích hợp phục vụ quá trình ra quyết định.

3.6.3. Tích hợp đánh giá môi trường và LCA trong quy hoạch và triển khai

Một nội dung trọng tâm của khung tiếp cận là việc tích hợp đánh giá tác động môi trường (EIA) và đánh giá vòng đời (LCA) trong toàn bộ quá trình quy hoạch, thiết kế và triển khai các dự án thành phố thông minh. Ở giai đoạn quy hoạch, cần xem xét và so sánh các kịch bản phát triển khác nhau dựa trên các chỉ tiêu về tác động môi trường và chi phí vòng đời. Trong giai đoạn thiết kế, việc lựa chọn công nghệ và vật liệu cần dựa trên kết quả phân tích LCA nhằm giảm thiểu các tác động tiêu cực đến môi trường.

Trong giai đoạn vận hành, các hệ thống dữ liệu thời gian thực có thể được sử dụng để giám sát và tối ưu hóa hiệu quả môi trường và kinh tế của hệ thống. Đối với giai đoạn kết thúc vòng đời, cần xem xét khả năng tái sử dụng, tái chế và xử lý chất thải nhằm giảm thiểu tác động môi trường. Việc tích hợp LCA trong toàn bộ vòng đời giúp hạn chế hiện tượng chuyển dịch tác động giữa các giai đoạn, đồng thời đảm bảo các giải pháp được lựa chọn là tối ưu về môi trường trong dài hạn.

Hình 3. Khung tiếp cận tích hợp phát triển thành phố thông minh bền vững

3.6.4. Lồng ghép các yếu tố xã hội và lao động việc làm

Khung tiếp cận đề xuất cũng nhấn mạnh vai trò của việc lồng ghép các yếu tố xã hội trong phát triển thành phố thông minh. Trước hết, các giải pháp công nghệ, đặc biệt là tự động hóa và số hóa, có thể làm thay đổi cấu trúc thị trường lao động, do đó cần có các chính sách phù hợp nhằm hỗ trợ đào tạo lại và chuyển đổi nghề nghiệp cho người lao động. Đồng thời, cần đảm bảo tính công bằng trong tiếp cận công nghệ và dịch vụ đô thị, giúp mọi nhóm dân cư, đặc biệt là các nhóm yếu thế, có thể thụ hưởng lợi ích từ các giải pháp thông minh.

Bên cạnh đó, các giải pháp thành phố thông minh cần góp phần cải thiện sức khỏe cộng đồng và nâng cao chất lượng sống thông qua việc giảm ô nhiễm và cải thiện môi trường sống. Vấn đề bảo vệ quyền riêng tư và an toàn dữ liệu cũng cần được đặc biệt quan tâm trong bối cảnh gia tăng sử dụng dữ liệu và các nền tảng số. Việc áp dụng đánh giá vòng đời xã hội (Social LCA) cho phép lượng hóa và đánh giá các tác động này một cách có hệ thống, từ đó hỗ trợ xây dựng các chính sách phù hợp.

3.6.5. Chính sách và quản lý

Từ khung tiếp cận tích hợp được đề xuất, nghiên cứu đưa ra một số đề xuất về chính sách và quản lý nhằm thúc đẩy phát triển thành phố thông minh bền vững. Trước hết, cần tích hợp các công cụ đánh giá như LCA, LCC và Social LCA vào quy trình lập, thẩm định và triển khai các dự án đô thị. Đồng thời, việc xây dựng hệ thống cơ sở dữ liệu phục vụ đánh giá vòng đời là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy và hiệu quả của quá trình phân tích.

Bên cạnh đó, cần ban hành các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật liên quan đến phát triển thành phố thông minh bền vững, tạo cơ sở pháp lý cho việc triển khai trong thực tiễn. Việc thúc đẩy hợp tác giữa khu vực công, khu vực tư nhân và các tổ chức nghiên cứu cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đổi mới sáng tạo và chia sẻ nguồn lực. Cuối cùng, cần tăng cường năng lực cho các cơ quan quản lý trong việc áp dụng các công cụ đánh giá hiện đại, nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và ra quyết định trong phát triển đô thị.

3.6.6. Thảo luận

Khung tiếp cận đề xuất là đóng góp chính của nghiên cứu, cho phép tích hợp đồng thời các yếu tố công nghệ, phát triển bền vững và đánh giá vòng đời, qua đó hỗ trợ hiệu quả cho quá trình ra quyết định trong quy hoạch và quản lý đô thị.

Khung tiếp cận tích hợp được đề xuất cho thấy rằng việc xây dựng thành phố thông minh không thể tách rời khỏi mục tiêu phát triển bền vững. Công nghệ chỉ thực sự phát huy hiệu quả khi được đặt trong một hệ thống quản trị phù hợp và được đánh giá dựa trên các tiêu chí toàn diện về môi trường, kinh tế và xã hội. Việc quá nhấn mạnh vào công nghệ có thể dẫn đến những giải pháp thiếu bền vững nếu không xem xét đầy đủ các yếu tố kinh tế, môi trường và xã hội.

Trong bối cảnh đó, việc tích hợp LCA vào quá trình quy hoạch và phát triển đô thị là một hướng đi cần thiết nhằm đảm bảo các quyết định được đưa ra dựa trên đánh giá toàn diện và dài hạn. Đồng thời, cần có các chính sách hỗ trợ và khung pháp lý phù hợp để thúc đẩy việc áp dụng các công cụ này trong thực tiễn, góp phần định hướng phát triển đô thị theo hướng bền vững, thích ứng với các thách thức dài hạn như biến đổi khí hậu và chuyển đổi kinh tế - xã hội.

Cuối cùng, nghiên cứu cũng mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo, bao gồm việc áp dụng khung đề xuất vào các trường hợp cụ thể, đặc biệt trong bối cảnh các quốc gia đang phát triển, nhằm kiểm chứng và hoàn thiện mô hình thành phố thông minh bền vững.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu khẳng định rằng thành phố thông minh chỉ thực sự có ý nghĩa khi được phát triển trên nền tảng bền vững, trong đó công nghệ đóng vai trò công cụ thay vì mục tiêu. Công nghệ chỉ đóng vai trò là công cụ hỗ trợ nhằm đạt được các mục tiêu phát triển kinh tế, bảo vệ môi trường và đảm bảo công bằng xã hội. Kết quả phân tích cho thấy mối quan hệ giữa ba trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội mang tính tương tác phức tạp, đòi hỏi cách tiếp cận tích hợp trong quá trình quy hoạch và quản lý đô thị.

Việc tích hợp LCA, LCC và Social LCA cho phép đánh giá toàn diện các tác động trong suốt vòng đời, góp phần nâng cao chất lượng ra quyết định. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã đề xuất khung tiếp cận tích hợp, góp phần định hướng phát triển thành phố thông minh theo hướng bền vững, thích ứng với các thách thức về môi trường và xã hội. Khung tiếp cận đề xuất không chỉ có ý nghĩa lý luận mà còn có khả năng ứng dụng trong thực tiễn, đặc biệt trong bối cảnh các đô thị đang đối mặt với áp lực phát triển nhanh và các thách thức môi trường ngày càng gia tăng.

Khung tiếp cận đề xuất có thể được sử dụng như một công cụ tham chiếu trong quá trình quy hoạch và phát triển các thành phố thông minh tại Việt Nam.

Trong thời gian tới, cần tiếp tục nghiên cứu và áp dụng khung tiếp cận này vào các trường hợp cụ thể, đặc biệt trong bối cảnh các đô thị đang phát triển, nhằm kiểm chứng và hoàn thiện mô hình, hướng tới xây dựng các thành phố thông minh thực sự bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] British Standards Institute, Smart city framework. Guide to establishing strategies for smart cities and communities. PAS 181:2014. BSI, London, 2014.

[2] Caragliu A, Del Bo C, Nijkamp P. Smart cities in Europe. J Urban Technol 18(2):65-82, 2011.

[3] Chen T. Smart grids, smart cities need better networks [Editor's note]. IEEE Netw 24(2):2-3, 2010.

[4] Dameri RP. Smart city implementation. Springer Heidelberg, 2017.

[5] Galati SR. Funding a smart city: from concept to actuality. In: Smart cities. Springer, Cham, pp 17-39, 2018.

[6] Giffinger R, Fertner C, Kramar H, Kalasek R, Pichler-Milanović N, Meijers E (2007) Smart cities ranking of European medium-sized cities, 2007. Internet: http://www.smart-cities.eu/download/smart_cities_final_report.pdf (Truy cập tháng 03/2026).

[7] Jimenez J. Smart transportation systems. In: Smart cities. Springer, Cham, pp 123-133, 2018.

[8] Koutitas G. The smart grid: anchor of the smart city. In: Smart cities. Springer, Cham, pp 53-74, 2018.

[9] Lee JH, Phaal R, Lee S. An integrated service-device-technology roadmap for smart city develop-ment. Technol Forecast Soc Chang 80(2):286-306, 2013.

[10] Lehr T. Smart cities: vision on-the-ground. In: Smart cities. Springer, Cham, pp 3-15, 2018.

[11] Sanseverino ER, Sanseverino RR, Vaccaro V, Macaione I, Anello E. Smart cities: case studies. In: Smart cities atlas. Springer, Cham, pp 47-140, 2017.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 13/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Kiên cố hóa trường lớp tại khu vực biên giới: Đánh giá tiến trình chính sách và giải pháp thực thi

School solidification in border areas: Evaluation of policy progress and implementation solutions

> TS NGUYỄN VĂN TRUNG[1,*], THS NGUYỄN THÁI SƠN[2], TS LÊ VĂN TUẤN[1]
[1]GV Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[2]NCS Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: trungnv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Trong chiến lược phát triển bền vững và bảo vệ chủ quyền quốc gia, giáo dục tại khu vực biên giới đóng vai trò then chốt. Bài báo tập trung phân tích tiến trình thể chế hóa và hiện thực hóa hạ tầng giáo dục tại 248 xã biên giới đất liền Việt Nam trong giai đoạn 2013 - 2026. Thông qua phương pháp phân tích văn bản quy phạm pháp luật và đánh giá thực tiễn đầu tư, nghiên cứu làm rõ ba giai đoạn chuyển dịch quan trọng: xác lập tư duy chiến lược, định lượng mục tiêu chuẩn hóa và triển khai đồng bộ trên thực địa. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng việc kiên cố hóa trường lớp không chỉ là hoạt động xây dựng cơ bản thuần túy mà còn là một quá trình quản trị siêu dự án phức hợp. Bài báo đề xuất hệ thống giải pháp về quản trị rủi ro đa chiều và mô hình hợp tác công - tư quy mô nhỏ, hướng tới mục tiêu đạt trình độ giáo dục tiên tiến trong khu vực vào năm 2030.

Từ khóa: Đầu tư xây dựng trường học; xã biên giới; kiên cố hóa trường lớp; chiến lược phát triển giáo dục; quản trị công; hợp tác công tư (PPP).

ABSTRACT

In the strategy for sustainable development and safeguarding national sovereignty, education in border areas is designated as a top priority. This paper focuses on analyzing the institutionalization and implementation processes of educational infrastructure across 248 land border communes in Vietnam during the 2013–2026 period. Through normative legal document analysis and investment practice evaluation, the study elucidates three critical transitional phases: from establishing strategic thinking to quantifying standardized objectives and ultimately to comprehensive on-site implementation. The findings indicate that school solidification is not merely a basic capital construction activity but a complex megaproject management process. This process requires the rigorous integration of sustainable design and breakthrough capital mobilization mechanisms. The paper proposes a system of solutions regarding multidimensional risk management and small-scale Public-Private Partnership models, driving toward the goal of achieving an advanced regional education standard by 2030.

Keywords: School construction investment; border communes; school solidification; educational development strategy; public administration; Public-Private Partnership (PPP).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong chiến lược phát triển bền vững của mỗi quốc gia, giáo dục luôn được coi là động lực cốt lõi cho sự tăng trưởng kinh tế và ổn định xã hội. Đối với Việt Nam, vùng biên giới không chỉ là địa bàn có vị trí chiến lược đặc biệt quan trọng về quốc phòng, an ninh mà còn là "phên dậu" văn hóa của Tổ quốc. Việc đầu tư hạ tầng giáo dục tại 248 xã biên giới đất liền không đơn thuần là hoạt động xây dựng cơ bản, mà là công cụ then chốt để thực hiện công bằng xã hội, nâng cao dân trí và củng cố "thế trận lòng dân" nơi địa đầu phía Bắc, miền Trung và Tây Nguyên. Đảng và Nhà nước ta đã khẳng định giáo dục là "quốc sách hàng đầu", trong đó việc kiên cố hóa trường lớp vùng biên là nhiệm vụ trọng tâm để rút ngắn khoảng cách phát triển giữa các vùng miền [1].

Mặc dù đã có nhiều nỗ lực trong thập kỷ qua, thực trạng hạ tầng giáo dục vùng biên vẫn đối mặt với những thách thức nghiêm trọng. Trước khi các chủ trương mang tính đột phá gần đây được ban hành, tỷ lệ phòng học tạm, phòng học mượn tại các xã biên giới vẫn còn ở mức cao (chiếm gần 40%), gây ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng dạy và học [10]. Sự ra đời của Nghị quyết số 29-NQ/TW (2013) đã đặt

nền móng cho sự đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục [1]. Tiếp đó, Kết luận số 91-KL/TW (2024) và Thông báo số 81-TB/TW (2025) đã tạo ra một bước ngoặt lớn, chuyển từ tư duy hỗ trợ dàn trải sang đầu tư tập trung, định lượng mục tiêu 100% kiên cố hóa trường lớp vào năm 2030 [4], [8].

Vì vậy, bài báo thực hiện với mục tiêu: (1) Hệ thống hóa và phân tích sâu sắc tiến trình thể chế hóa đầu tư xây dựng (ĐTXD) trường học vùng biên qua các giai đoạn chiến lược; (2) Đánh giá mô hình thực thi tổng lực và hiện thực hóa công trình trên thực địa; và (3) Đề xuất các định hướng quản trị rủi ro và giải pháp huy động nguồn lực nhằm nâng cao hiệu quả đầu tư công. Nghiên cứu kỳ vọng sẽ mang lại đóng góp quan trọng về mặt thực tiễn cho các nhà quản lý dự án và hoạch định chính sách, cung cấp một cái nhìn toàn diện về cách thức vận hành "siêu dự án" hạ tầng giáo dục tại các vùng địa đầu Tổ quốc, hướng tới mục tiêu hiện đại hóa giáo dục Việt Nam vào năm 2030.

2. HÀNH TRÌNH TỪ CHIẾN LƯỢC ĐẾN HIỆN THỰC

2.1. Giai đoạn thiết lập tư duy chiến lược và tạo lập khung pháp lý (2013 - 2023)

Giai đoạn 2013 - 2023 được định nghĩa là thời kỳ kiến tạo "hệ điều hành" cho toàn bộ sự nghiệp đổi mới giáo dục và đào tạo. Sự ra đời của Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 không chỉ là một văn kiện chính trị thông thường mà là một cuộc cách mạng về tư duy quản trị hệ thống. Nghị quyết này xác lập nguyên tắc cốt lõi: Nhà nước giữ vai trò chủ đạo trong đầu tư phát triển giáo dục, đồng thời khẳng định việc đảm bảo công bằng cơ hội tiếp cận giáo dục là một chỉ số đo lường sự phát triển bền vững của quốc gia [1].

Trong lý luận quản lý công, việc ưu tiên cho các xã biên giới, vùng đặc biệt khó khăn trong Nghị quyết 29-NQ/TW chính là sự áp dụng học thuyết "công bằng xã hội" vào phân bổ nguồn lực công, tạo ra "xương sống" pháp lý để các cơ quan quản lý ĐTXD bắt đầu thực hiện tái cấu trúc danh mục đầu tư công trung hạn.

Về mặt quản lý xây dựng, đây là giai đoạn đặt nền móng cho việc chuẩn hóa cơ sở vật chất, xác định các mức tiêu chuẩn kỹ thuật tối thiểu mà mỗi cơ sở giáo dục vùng biên phải đạt được, từ đó tạo tiền đề cho việc huy động các nguồn vốn từ ngân sách Trung ương (thông qua các Chương trình mục tiêu quốc gia) và ngân sách địa phương.

Sau 5 năm thực hiện, sự chuyển dịch chính sách tiếp tục được củng cố bằng Kết luận số 51-KL/TW ngày 30/5/2019 của Ban Bí thư. Văn bản này đóng vai trò "hiệu chỉnh chính sách" sau khi nhận diện những khoảng cách về hạ tầng giáo dục còn tồn tại giữa vùng biên giới và vùng đồng bằng. Kết luận 51-KL/TW đã đưa ra một mệnh lệnh hành chính mạnh mẽ: "tập trung giải quyết dứt điểm" tình trạng thiếu hụt phòng học, đặc biệt là tại các vùng sâu, vùng xa, biên giới [3]. Sự thay đổi từ thuật ngữ "ưu tiên" sang "giải quyết dứt điểm" thể hiện bước tiến trong quản lý nhà nước, chuyển từ mô hình quản lý theo quy trình sang quản lý theo kết quả.

Những phân tích từ các văn kiện trên cho thấy một lộ trình pháp lý chặt chẽ và nhất quán, tạo ra các tác động thực tiễn rõ rệt tại các địa phương biên giới:

- Về quy hoạch đầu tư: Các địa phương đã bắt đầu tích hợp kế hoạch xây dựng trường học vào Quy hoạch tỉnh thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, đảm bảo tính liên kết giữa giáo dục với phát triển kinh tế và quốc phòng và an ninh.
- Về huy động nguồn lực: Giai đoạn này ghi nhận sự hình thành các mô hình hợp tác đa bên, nơi ngân sách nhà nước đóng vai trò "vốn mồi", kết hợp với các chương trình như "Kiên cố hóa trường lớp học" và các nguồn xã hội hóa, giúp tỷ lệ trường chuẩn quốc gia tại nhiều tỉnh biên giới tăng trưởng mạnh mẽ, điển hình như tại Thanh Hóa đã đạt 83,89% vào cuối giai đoạn này.
- Về tiêu chuẩn kỹ thuật: Việc ban hành các Thông tư về tiêu chuẩn cơ sở vật chất (như Thông tư 13/2020/TT-BGDĐT của Bộ GD&ĐT) trong giai đoạn này đã hiện thực hóa các yêu cầu về không gian học tập, phòng nội trú và các công trình phụ trợ, đảm bảo trường học vùng biên không chỉ là nơi dạy học mà còn là trung tâm văn hóa - chính trị của xã biên giới.

Sự ra đời của Nghị quyết số 29-NQ/TW đã thiết lập một hệ giá trị mới cho giáo dục vùng khó khăn [1]. Tuy nhiên, tính cấp bách của chính sách chỉ thực sự được làm nổi bật khi đặt vào bối cảnh hiện trạng hạ tầng tại 248 xã biên giới đất liền. Ví dụ, tại Thanh Hóa, sự chênh lệch hạ tầng giữa các huyện biên giới như Mường Lát, Quan Sơn với vùng đồng bằng là rất lớn, đòi hỏi Nghị quyết 44/NQ-CP và Kết luận 51-KL/TW phải đưa ra các mệnh lệnh hành chính mạnh mẽ nhằm "giải quyết dứt điểm" tình trạng này [2], [3].

Giai đoạn 2013 - 2023 đã tạo lập "hành lang pháp lý" và "tư duy chiến lược". Đây là bước chuẩn bị tất yếu và cần thiết để đưa công tác ĐTXD trường học vùng biên bước vào giai đoạn tăng tốc và hiện thực hóa thực địa một cách khoa học, bài bản trong những năm tiếp theo.

2.2. Giai đoạn tăng tốc, định lượng mục tiêu và chuẩn hóa cơ sở hạ tầng (2024 - đầu 2025)

Giai đoạn này chứng kiến sự chuyển mình từ mục tiêu định tính sang quản trị bằng chỉ số (KPIs). Kết luận số 91-KL/TW (12/8/2024) và Quyết định 1705/QĐ-TTg đã ấn định mục tiêu 100% kiên cố hóa trường lớp vào năm 2030 [4], [5]. Điểm cốt lõi của giai đoạn này là sự chuẩn hóa thiết kế gắn liền với thực địa khó khăn.

Phân tích nội hàm của Kết luận 91-KL/TW cho thấy một sự thay đổi về chất trong phương thức quản lý đầu tư công cho giáo dục. Văn bản này không chỉ nhắc lại Nghị quyết 29-NQ/TW mà còn xác lập một lộ trình khẩn trương hơn: cơ bản kiên cố hóa trường, lớp học vào năm 2030 và hướng tới mục tiêu giáo dục Việt Nam đạt trình độ tiên tiến khu vực.

Giai đoạn này chứng kiến sự chuyển dịch từ mục tiêu định tính sang mô hình quản trị dựa trên chỉ số đánh giá hiệu quả (KPIs). Kết luận số 91-KL/TW ngày 12/8/2024 và Quyết định số 1705/QĐ-TTg ngày 31/12/2024 đã xác lập mục tiêu hoàn thành 100% kiên cố hóa trường lớp vào năm 2030 [4], [5]. Điểm cốt lõi của giai đoạn này là việc chuẩn hóa thiết kế gắn với điều kiện thực địa khó khăn.

Phân tích nội hàm của Kết luận số 91-KL/TW cho thấy sự chuyển biến căn bản trong phương thức quản lý đầu tư công đối với giáo dục. Văn bản này không chỉ kế thừa tinh thần của Nghị quyết số 29-NQ/TW mà còn xác lập một lộ trình rõ ràng và quyết liệt hơn: cơ bản hoàn thành kiên cố hóa trường, lớp học vào năm 2030, đồng thời hướng tới mục tiêu đưa nền giáo dục Việt Nam đạt trình độ tiên tiến trong khu vực.

Để hiện thực hóa quyết tâm chính trị đó, Chính phủ đã ban hành Quyết định số 1705/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển giáo dục đến năm 2030 [5]. Dưới góc nhìn chuyên ngành xây dựng, văn bản này là một "bản quy hoạch tổng thể" có tính chất định lượng cao, xác lập các chỉ số kỹ thuật (Key Performance Indicators - KPIs) khắt khe cho hạ tầng giáo dục vùng khó khăn:

- Chuẩn hóa tỷ lệ kiên cố hóa: Quyết định ấn định mục tiêu 100% phòng học kiên cố ở tất cả các cấp học, đặc biệt nhấn mạnh việc ưu tiên xóa bỏ hoàn toàn các điểm trường tranh tre nứa lá tại các xã biên giới. Việc định lượng hóa 100% là cơ sở để Bộ Kế hoạch và Đầu tư cùng Bộ Tài chính thiết lập các gói vốn đặc thù.
- Tích hợp hạ tầng hiện đại: Quyết định 1705/QĐ-TTg lần đầu tiên đưa vào tiêu chuẩn bắt buộc về hạ tầng số và phòng chức năng thông minh cho các trường phổ thông. Điều này đòi hỏi quy trình ĐTXD tại biên giới phải thay đổi từ thiết kế truyền thống sang thiết kế tích hợp công nghệ (Smart School), phù hợp với mục tiêu hội nhập quốc tế.

Về mặt tiêu chuẩn và quy chuẩn kỹ thuật, việc áp dụng triệt để TCVN 8794:2021 trong giai đoạn này là yếu tố then chốt để đảm bảo chất lượng công trình [9]. Việc phân tích tiêu chuẩn này trong bối cảnh các xã biên giới cho thấy sự đề cao tính an toàn và bền vững trước các rủi ro thiên tai (lũ ống, lũ quét và sạt lở đất) là đặc thù của vùng cao. Quy chuẩn yêu cầu mật độ xây dựng không quá 40% và ưu tiên diện tích cho không gian xanh, bãi tập, nhà nội trú. Đây là những "định mức kỹ thuật" bắt buộc phải được tuân thủ trong quá trình lập Báo cáo nghiên cứu khả thi (FS), giúp các dự án xây dựng trường học vùng biên thoát khỏi mô hình "nhà hộp" đơn điệu, chuyển sang mô hình "không gian giáo dục mở" và an toàn.

Việc áp dụng TCVN 8794:2021 không chỉ dừng lại ở các thông số diện tích mà còn phải giải quyết bài toán quản trị rủi ro xây dựng ngay từ bước lập dự án [9]. Đối với các công trình vùng biên, quản trị rủi ro tập trung vào ba trụ cột:

- Logistics và vận chuyển: Thiết lập các trạm trung chuyển vật liệu và tận dụng nguồn lực tại chỗ để ứng phó với cung đường vận chuyển hiểm trở.
- Địa chất và địa hình: Ưu tiên giải pháp móng thích ứng với địa hình dốc và nguy cơ sạt lở cao.
- Yếu tố an ninh: Phối hợp chặt chẽ với các đồn biên phòng để đảm bảo an ninh công trường và an toàn cho đội ngũ thi công tại khu vực nhạy cảm.

Bên cạnh đó, sự xuất hiện của Nghị quyết 124/NQ-CP ngày 08/5/2025 đã đóng vai trò là công cụ điều tiết vốn, yêu cầu đảm bảo ngân sách nhà nước chi cho giáo dục tối thiểu 20% tổng chi ngân sách [6]. Trong quản trị ĐTXD, việc duy trì tỷ lệ 20% này là "nguồn mạch" sống còn, đảm bảo các dự án kiên cố hóa trường lớp tại biên giới không rơi vào tình trạng đình hoãn do thiếu vốn. Cơ chế tài chính này gắn liền với các tiêu chuẩn chuẩn hóa cơ sở vật chất theo Thông tư 13/2020/TT-BGDĐT, tạo nên một chu trình khép kín: từ chuẩn hóa thiết kế - đến định lượng mục tiêu - và bảo đảm nguồn lực tài chính.

Giai đoạn tăng tốc 2024 - đầu năm 2025 đã thành công trong việc cụ thể hóa các mục tiêu chính sách thành các chỉ tiêu quản lý và kỹ thuật. Sự chuyển dịch từ các định hướng mang tính khái quát sang hệ thống chỉ tiêu, tiêu chuẩn và tỷ lệ cụ thể đã tạo nền tảng quản trị rõ ràng và khả thi. Đây là tiền đề quan trọng để từ giữa năm 2025, các cơ quan chức năng có đủ cơ sở dữ liệu và hành lang pháp lý nhằm triển khai đồng bộ các dự án trên thực địa, đưa quá trình ĐTXD trường học vùng biên bước sang giai đoạn thực hiện quy mô lớn.

2.3. Giai đoạn thực thi tổng lực và hiện thực hóa công trình trên thực địa (giữa 2025 - 2026)

Giai đoạn từ giữa năm 2025 đến năm 2026 là điểm nút quyết định trong toàn bộ chu trình chính sách, đánh dấu sự chuyển hóa từ các nghị quyết trên giấy thành các thực thể kiến trúc hiện hữu trên thực địa. Quá trình này đòi hỏi sự phối hợp liên ngành cao độ, sự nhạy bén trong việc tháo gỡ các rào cản thể chế và năng lực tổ chức thi công trong những điều kiện địa lý, logistics khắc nghiệt nhất của đất nước. Đây là giai đoạn các văn bản hành chính như Nghị quyết 124/NQ-CP và Thông báo 81-TB/TW được hiện thực hóa bằng nguồn lực tổng hợp [6], [8].

Sự khởi đầu cho chiến dịch thực thi này được kích hoạt bởi Nghị quyết 124/NQ-CP ban hành ngày 08/5/2025. Dưới lăng kính quản lý dự án công, đây là một nghị quyết mang tính "giải phóng nguồn lực". Khi đối mặt với đặc thù suất ĐTXD tại vùng núi biên giới thường cao gấp 1,5 đến 2 lần so với vùng đồng bằng do chi phí vận chuyển vật liệu và san lấp mặt bằng, Nghị quyết 124/NQ-CP đã cung cấp một hành lang pháp lý linh hoạt, cho phép áp dụng các cơ chế quản lý đặc thù nhằm đẩy nhanh tiến độ thẩm định, phê duyệt và giải ngân. Việc Chính phủ cam kết duy trì tỷ lệ ngân sách chi cho giáo dục và điều tiết vốn kịp thời đã giúp các Ban quản lý dự án địa phương khắc phục được rủi ro "đứt gãy dòng tiền", một rào cản kinh điển trong các dự án hạ tầng vùng sâu, vùng xa [6].

Chuyển biến sâu sắc nhất về tư duy kiến tạo không gian giáo dục được thể hiện qua Tờ trình 973/TTr-BGDĐT ngày 15/7/2025. Tài liệu này không đơn thuần là một đề xuất xin cấp vốn, mà là một bản tái cấu trúc mô hình đầu tư hạ tầng. Thay vì đầu tư dàn trải, xé lẻ thành các điểm trường nhỏ không đủ tiêu chuẩn, Tờ trình 973/TTr-BGDĐT đã mạnh dạn đề xuất mô hình "trường phổ thông nội trú liên cấp". Phân tích dưới góc độ kinh tế học xây dựng, việc "liên cấp" tạo ra lợi thế kinh tế nhờ quy mô (Economies of scale). Các cấp học sẽ dùng chung hạ tầng phụ trợ đắt đỏ như nhà đa năng, thư viện điện tử, nhà bếp và khu nội trú. Điều này vừa giải quyết được bài toán thiếu hụt quỹ đất bằng phẳng tại các xã biên giới, vừa tối ưu hóa được chi phí bảo trì và vận hành công trình trong vòng đời dự án (Life-cycle cost) [7].

Bệ phóng pháp lý cao nhất và có sức nặng chính trị tuyệt đối trong giai đoạn này là Thông báo số 81-TB/TW ngày 18/7/2025 của Bộ Chính trị. Văn kiện này đóng vai trò như một "lệnh tổng động viên" toàn hệ thống chính trị, phê chuẩn chủ trương đầu tư cho 248 xã biên giới đất liền. Từ khía cạnh quản trị rủi ro và huy động vốn, Thông báo 81 đã định hướng việc kết hợp nguồn vốn ngân sách Trung ương với mô hình Hợp tác công tư (PPP) quy mô nhỏ, đồng thời huy động sức mạnh của lực lượng quân đội (các đoàn kinh tế - Quốc phòng) tham gia vào quá trình san lấp, mở đường và vận chuyển vật tư. Đây là giải pháp quản trị logistics xuất sắc, khắc phục triệt để rào cản về cơ sở hạ tầng giao thông yếu kém tại khu vực phên dậu [8].

Một điểm mới mang tính đột phá trong giai đoạn này là việc cụ thể hóa cơ chế Hợp tác công tư (PPP) quy mô nhỏ để khả thi hóa việc huy động vốn:

- Nhà nước đầu tư "phần cứng" (xây lắp khối nhà chính, hạ tầng kỹ thuật).
- Doanh nghiệp và các tổ chức xã hội tham gia "phần mềm" và các hạng mục phụ trợ thông qua hình thức xây dựng - chuyển giao hoặc hỗ trợ trang thiết bị cho các "Studio công nghệ" và khu nội trú.
- Sự vào cuộc của Mặt trận Tổ quốc không chỉ dừng lại ở lời kêu gọi, mà đóng vai trò là "trọng tài" giám sát việc phân bổ nguồn vốn xã hội hóa, đảm bảo tính minh bạch và hiệu quả trong đầu tư tại địa bàn khó khăn.

Giai đoạn thực thi 2025 - 2026 đã chứng minh rằng một chiến lược đúng đắn nếu được quản trị bằng những cơ chế linh hoạt, tư duy đầu tư khoa học và quyết tâm chính trị mạnh mẽ, hoàn toàn có thể biến những vùng đất khô cằn nơi biên giới thành những trung tâm ươm mầm tri thức hiện đại. Những ngôi trường nội trú liên cấp không chỉ là các công trình giáo dục kiên cố, mà đã trở thành những "cột mốc chủ quyền dân trí", đóng vai trò cốt lõi trong chiến lược giữ dân, bám biên và bảo vệ vững chắc độc lập, toàn vẹn lãnh thổ quốc gia.

3. MỘT SỐ ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG NHẰM HIỆN THỰC HÓA CHỦ TRƯƠNG ĐẦU TƯ

3.1. Thể chế hóa chính sách đặc thù và đột phá cơ chế huy động vốn

Việc đầu tư hạ tầng tại các khu vực vùng sâu, vùng xa thường đối mặt với hiện tượng "thất bại của thị trường" do chi phí cơ hội lớn và lợi ích kinh tế thu về thấp. Điều này đòi hỏi sự can thiệp mạnh mẽ bằng các chính sách "phi đối xứng" từ Nhà nước. Để khắc phục, cần thiết lập một khung pháp lý ưu tiên cao nhất về đất đai và thuế; trong đó cho phép chuyển đổi linh hoạt mục

đích sử dụng đất sang đất giáo dục và tối ưu hóa các cơ sở vật chất công dôi dư sau tinh giản biên chế. Bên cạnh vai trò "vốn mồi" của ngân sách theo tinh thần Nghị quyết 124/NQ-CP [6], việc triển khai cơ chế Hợp tác công tư (PPP) quy mô nhỏ là giải pháp tất yếu. Theo đó, Nhà nước cần giới hạn trách nhiệm đầu tư ở "phần cứng", đồng thời mở ra cơ chế minh bạch nhằm thu hút khối tư nhân và các tổ chức xã hội tài trợ cho "phần mềm". Sự giám sát độc lập của Ủy ban Mặt trận Tổ quốc sẽ là cơ sở pháp lý đảm bảo tính minh bạch, giúp dòng vốn xã hội hóa được phân bổ đúng mục tiêu.

3.2. Đổi mới tư duy thiết kế kiến trúc và chuẩn hóa không gian giáo dục

Việc xây dựng hạ tầng giáo dục tại vùng biên giới cần đoạn tuyệt với tư duy "xây cho có", thay vào đó phải tuân thủ nghiêm ngặt các quy chuẩn hiện đại nhằm đảm bảo tính bền vững vòng đời dự án. Cụ thể, việc áp dụng TCVN 8794:2021 [9] phải được cụ thể hóa bằng các tiêu chí: mật độ xây dựng không vượt quá 40% và đảm bảo định mức diện tích khu đất đạt 8-10 m^2/học sinh. Để thích ứng với địa hình chia cắt mạnh và khí hậu khắc nghiệt, giải pháp kiến trúc "hợp khối liên hoàn" là lựa chọn tối ưu, giúp thu gọn mặt bằng, kết nối xuyên suốt các không gian học tập và sinh hoạt bán trú trong một tổ hợp an toàn. Hơn nữa, nhằm hiện thực hóa mục tiêu giáo dục đạt trình độ tiên tiến của khu vực theo Kết luận số 91-KL/TW [4], thiết kế dự án phải tích hợp các "Studio công nghệ" và phòng thí nghiệm tương tác, tạo nền tảng vật chất vững chắc cho công cuộc chuyển đổi số giáo dục ngay tại địa bàn phên dậu.

3.3. Phân cấp quản lý và nâng cao năng lực thực thi của chính quyền địa phương

Hiệu quả cuối cùng của việc hiện thực hóa dự án phụ thuộc phần lớn vào năng lực vận hành tại cơ sở. Việc phân cấp, phân quyền mạnh mẽ cho chính quyền hai cấp (tỉnh, huyện) cần đi đôi với việc nâng cao quyền tự chủ, tự chịu trách nhiệm cho các Ban quản lý dự án chuyên ngành. Chính quyền các địa phương biên giới phải có trách nhiệm thể chế hóa các mục tiêu chiến lược thành "Chương trình hành động" có đo lường chỉ số KPIs, đưa nhiệm vụ xây dựng trường học thành khâu đột phá trong nghị quyết phát triển kinh tế - xã hội định kỳ. Sự vào cuộc đồng bộ của hệ thống chính trị địa phương chính là chìa khóa để tháo gỡ các nút thắt về đền bù, giải phóng mặt bằng và tối ưu hóa các nguồn lực tại chỗ.

4. KẾT LUẬN

Hành trình từ chiến lược đến hiện thực trong việc ĐTXD trường học tại các xã biên giới là minh chứng sống động cho quyết tâm chính trị và năng lực quản trị nhà nước hiện đại của Việt Nam. Qua quá trình nghiên cứu và phân tích sâu sắc các tầng nấc văn bản từ Trung ương đến địa phương, có thể rút ra các kết luận khoa học sau:

Thứ nhất, tiến trình kiên cố hóa trường lớp vùng biên giai đoạn 2013 - 2026 không phải là một chuỗi các hoạt động rời rạc mà là một lộ trình mang tính hệ thống, có sự kế thừa và phát triển chặt chẽ về mặt tư duy chính trị. Sự chuyển dịch từ mục tiêu định tính "ưu tiên" sang các chỉ số định lượng "100% kiên cố hóa" đã tạo ra xung lực mạnh mẽ cho toàn bộ hệ thống hành chính, buộc các địa phương phải thay đổi phương thức quản lý từ "dựa trên nguồn lực sẵn có" sang "quản trị theo mục tiêu chiến lược".

Thứ hai, việc đầu tư hạ tầng giáo dục tại địa bàn đặc thù như 248 xã biên giới đòi hỏi một sự thay đổi căn bản trong tư duy kỹ thuật và kinh tế xây dựng. Mô hình trường phổ thông nội trú liên cấp tích hợp không gian học tập thông minh, dựa trên giải pháp kiến trúc "hợp khối liên hoàn", chính là đáp án tối ưu cho bài toán về địa hình chia cắt và khí hậu cực đoan. Đồng thời, việc chuyển đổi từ cơ chế bao cấp hoàn toàn sang mô hình phối hợp đa bên thông qua cơ chế PPP quy mô nhỏ đã mở ra hướng đi mới bền vững, giảm tải áp lực cho ngân sách nhà nước.

Thứ ba, sự kiện đồng loạt khởi công 148 ngôi trường vào tháng 3/2026 không chỉ mang ý nghĩa là những công trình vật chất mà còn là những "cột mốc chủ quyền dân trí". Mỗi ngôi trường được xây dựng kiên cố nơi biên thùy chính là một pháo đài văn hóa, góp phần giữ dân, bám biên và tạo nền tảng cho sự phát triển nhân lực tại chỗ - yếu tố cốt lõi để bảo vệ vững chắc độc lập và toàn vẹn lãnh thổ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Ban Chấp hành Trung ương Đảng, Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 về Đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục và đào tạo, đáp ứng yêu cầu công nghiệp hóa, hiện đại hóa trong điều kiện kinh tế thị trường định hướng xã hội chủ nghĩa và hội nhập quốc tế. Hà Nội, 2013.

[2] Chính phủ, Nghị quyết số 44/NQ-CP ngày 09/6/2014 ban hành Chương trình hành động của Chính phủ thực hiện Nghị quyết số 29-NQ/TW. Hà Nội, 2014.

[3] Ban Bí thư, Kết luận số 51-KL/TW ngày 30/5/2019 về Tiếp tục thực hiện Nghị quyết Hội nghị Trung ương 8 khóa XI về Đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục và đào tạo đáp ứng yêu cầu công nghiệp hóa, hiện đại hóa trong điều kiện kinh tế thị trường định hướng xã hội chủ nghĩa và hội nhập quốc tế. Hà Nội, 2019.

[4] Bộ Chính trị, Kết luận số 91-KL/TW ngày 12/8/2024 về tiếp tục thực hiện Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 của Hội nghị Trung ương 8 khóa XI về đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục và đào tạo. Hà Nội, 2024.

[5] Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 1705/QĐ-TTg ngày 31/12/2024 phê duyệt Chiến lược phát triển giáo dục đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045. Hà Nội, 2024.

[6] Chính phủ, Nghị quyết số 124/NQ-CP ngày 08/5/2025 về phiên họp Chính phủ thường kỳ tháng 4/2025 liên quan đến tháo gỡ rào cản thể chế và thúc đẩy giải ngân vốn đầu tư công tại các địa bàn trọng điểm. Hà Nội, 2025.

[7] Bộ Giáo dục và Đào tạo, Tờ trình số 973/TTr-BGDĐT ngày 15/7/2025 về chủ trương đầu tư xây dựng hệ thống trường phổ thông nội trú liên cấp tại 248 xã biên giới đất liền. Hà Nội, 2025.

[8] Ban Bí thư, Thông báo số 81-TB/TW ngày 18/7/2025 về kết luận chủ trương huy động nguồn lực tổng thể đầu tư xây dựng trường học vùng biên giới. Hà Nội, 2025.

[9] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 8794:2021 - Trường trung học - Tiêu chuẩn thiết kế. Hà Nội, 2021. [Trực tuyến]. Available: https://tieuchuan.vsqi.gov.vn/tcvn-8794-2021 (truy cập tháng 4/2026).

[10] Nguyễn Thái Sơn, "Xây trường nội trú biên giới: Dồn lực thay đổi diện mạo giáo dục vùng khó", Báo cáo viên, 2026 (truy cập tháng 5/2026).

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Đánh giá định lượng hiệu quả đầu tư hệ cốp pha nhôm tích hợp tự động hóa trong thi công nhà cao tầng

Quantitative assessment of investment efficiency in automation-integrated aluminum formwork systems in high-rise building construction

> TS TẠ VĂN PHẤN*, TS CHU TUẤN LONG
Trường Đại học Thủy lợi; *Email: phantv@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu đánh giá định lượng hiệu quả đầu tư của hệ cốp pha nhôm tích hợp cơ giới hóa và tự động hóa trong thi công nhà cao tầng. Nghiên cứu xây dựng khung phân tích kết hợp mô hình tiến độ thi công, mô hình năng suất lao động, mô hình chi phí vòng đời (LCC) và mô hình tài chính dựa trên giá trị hiện tại thuần (NPV). Phân tích độ nhạy và mô phỏng Monte Carlo được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của các biến đầu vào quan trọng như số tầng công trình, lãi suất vốn vay, mức giảm nhân công và chi phí đầu tư ban đầu. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc tích hợp hệ cốp pha tự leo giúp rút ngắn chu kỳ thi công tầng khoảng 27-30%, tăng năng suất lao động trung bình khoảng 35% và giảm đáng kể nhu cầu lao động trực tiếp. Phân tích tài chính cho thấy các dự án từ 25-30 tầng trở lên có khả năng đạt giá trị NPV dương rõ rệt. Ngoài ra nghiên cứu còn xây dựng ma trận rủi ro kỹ thuật nhằm hỗ trợ quá trình ra quyết định đầu tư công nghệ trong thi công nhà cao tầng.

Từ khóa: Cốp pha nhôm; tự leo; tự động hóa; mô hình chi phí vòng đời; NPV; công nghiệp hóa xây dựng.

ABSTRACT

This research paper quantitatively evaluates the investment efficiency of integrated mechanized and automated aluminum formwork systems in high-rise building construction. The study develops an analytical framework combining construction schedule models, labor productivity models, lifecycle cost (LCC) models, and net present value (NPV)-based financial models. Sensitivity analysis and Monte Carlo simulation are used to assess the impact of key input variables such as the number of floors, loan interest rates, labor reductions, and initial investment costs. The results show that integrating self-climbing formwork systems shortens the construction cycle by approximately 27–30%, increases average labor productivity by about 35%, and significantly reduces the need for direct labor. Financial analysis indicates that projects with 25–30 floors or more have the potential to achieve a significantly positive NPV. Additionally, the study developed a technical risk matrix to support the decision-making process for technology investments in high-rise building construction.

Keywords: Aluminum formwork; self-climbing system; automation; life cycle cost; net present value; construction industrialization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự gia tăng nhanh chóng của các công trình nhà cao tầng tại các đô thị lớn đặt ra yêu cầu cao về tiến độ, chất lượng và an toàn thi công. Trong khi đó, lực lượng lao động xây dựng ngày càng thiếu hụt và chi phí nhân công tăng cao. Các phương pháp thi công truyền thống dựa nhiều vào lao động thủ công không còn đáp ứng được yêu cầu cạnh tranh hiện nay.

Cốp pha nhôm đã được ứng dụng rộng rãi trong hơn một thập kỷ qua nhờ khả năng tái sử dụng cao, độ chính xác hình học tốt và rút ngắn chu kỳ thi công. Tuy nhiên, thế hệ cốp pha nhôm mới không chỉ dừng lại ở mức độ cơ giới hóa đơn lẻ mà đang chuyển sang tích hợp đồng bộ với hệ thống tự leo, robot hỗ trợ lắp dựng và cảm biến thông minh.

Công nghiệp hóa trong xây dựng được xem là trụ cột nâng cao năng suất ngành Xây dựng trong bối cảnh chi phí lao động tăng và yêu cầu rút ngắn tiến độ ngày càng cao. Theo lý thuyết đường cong học tập, năng suất thi công tăng khi quy trình được chuẩn hóa và cơ giới hóa [1]. Hệ cốp pha nhôm tích hợp tự leo và tự động hóa là một biểu hiện cụ thể của quá trình này.

Tại các quốc gia phát triển như Nhật Bản, Hàn Quốc, Singapore và Đức, ngành Xây dựng đã chuyển mạnh sang mô hình thi công bán tự động và tự động hóa. Hệ thống cốp pha tự leo được áp dụng phổ biến trong thi công lõi cứng nhà cao tầng và công trình siêu cao tầng.

Tuy nhiên, tại Việt Nam, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu dừng ở phân tích mô tả kỹ thuật, thiếu mô hình định lượng và phân tích tài chính chuyên sâu. Việc nghiên cứu xu hướng phát triển và khả

năng áp dụng hệ cốp pha nhôm tích hợp tự động hóa là cần thiết nhằm định hướng cho các chủ đầu tư, nhà thầu và cơ quan quản lý trong chiến lược công nghiệp hóa ngành xây dựng.

Vì vậy, bài báo hướng tới xây dựng khung phân tích học thuật toàn diện gồm:

- Mô hình năng suất thi công;
- Mô hình tài chính NPV;
- Phân tích độ nhạy và rủi ro.

Hình 1. Hệ cốp pha nhôm: toàn bộ ván khuôn cột, vách, dầm sàn, thang bộ được ghép đồng thời

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích định lượng kết hợp mô phỏng nhằm đánh giá hiệu quả đầu tư của hệ cốp pha nhôm tích hợp tự động hóa.

a. Các bước nghiên cứu bao gồm:

- Tổng quan lý thuyết về công nghiệp hóa xây dựng và hệ cốp pha tự leo.
- Xây dựng mô hình tiến độ thi công tầng.
- Xây dựng mô hình năng suất lao động.
- Phân tích chi phí vòng đời (LCC).
- Phân tích tài chính dựa trên giá trị hiện tại thuần (NPV).
- Phân tích độ nhạy và mô phỏng Monte Carlo để đánh giá rủi ro đầu tư.

b. Các biến đầu vào chính gồm:

- Số tầng công trình (N).
- Chi phí đầu tư bổ sung (ΔC_0).
- Lãi suất vốn vay (r).
- Mức giảm nhân công (%).
- Tỷ lệ tái sử dụng

3. TỔNG QUAN LÝ THUYẾT VỀ CÔNG NGHIỆP HÓA XÂY DỰNG VÀ HỆ CỐP PHA TỰ LEO

Hệ cốp pha nhôm truyền thống gồm các panel module hóa liên kết bằng chốt và khóa nêm. Thế hệ mới được cải tiến theo các hướng:

- Tối ưu hóa trọng lượng và độ bền vật liệu
- Chuẩn hóa mô-đun đồng bộ
- Tích hợp cơ cấu nâng thủy lực hoặc cơ điện
- Ứng dụng vật liệu hợp kim nhôm cường độ cao

Công nghiệp hóa xây dựng dựa trên ba trụ cột: chuẩn hóa - cơ giới hóa - số hóa [2]. Tự động hóa trong thi công bê tông toàn khối làm giảm biến động năng suất và tăng độ lặp lại quy trình.

4. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TIẾN ĐỘ THI CÔNG TẦNG

Chu kỳ thi công một tầng được cấu thành bởi:

$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$

Trong đó: t_1 - lắp dựng cốp pha; t_2 - lắp đặt cốt thép; t_3 - đổ bê tông; t_4 - bảo dưỡng chờ cường độ; t_5 - tháo và nâng hệ

Ảnh hưởng của tự động hóa chủ yếu làm giảm t_1 và t_5.

Giả định số liệu khảo sát trung bình (công trình 30 tầng, diện tích 1000 m²/tầng):

Bảng 1. So sánh chu kỳ thi công tầng

Công đoạn	Nhôm thường (ngày)	Tự leo tích hợp (ngày)
Lắp dựng cốp pha	1,4	0,8
Lắp đặt cốt thép	1,2	1,2
Đổ bê tông	0,6	0,6
Bảo dưỡng chờ cường độ	0,9	0,9
Tháo và nâng hệ	0,4	0,2
Tổng T	**4,5**	**3,7 → tối ưu 3,3**

Hệ số cải thiện tiến độ:

$$k_T = \frac{T_{trad} - T_{auto}}{T_{trad}} = \frac{4,5 - 3,3}{4,5} \approx 26,7\%$$

Tổng thời gian phần thân:

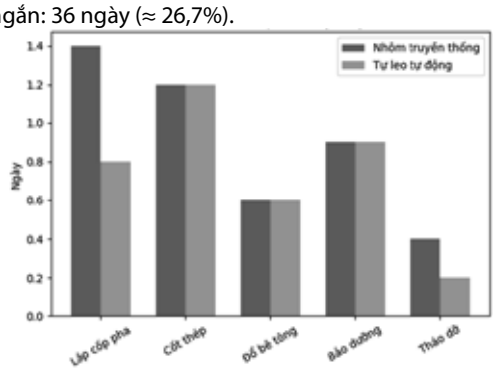
$TT = N \times T$

Với N = 30 tầng:

$TT_{trad} = 30 \times 4,5 = 135$ ngày;

$TT_{auto} = 30 \times 3,3 = 99$ ngày

Rút ngắn: 36 ngày (≈ 26,7%).



Hình 2. So sánh chu kỳ thi công tầng

Kết quả mô phỏng cho công trình nhà cao tầng 30 tầng với diện tích trung bình 1000 m²/tầng cho thấy:

Chu kỳ thi công tầng giảm từ 4,5 ngày xuống còn 3,3 ngày khi sử dụng hệ cốp pha nhôm tích hợp tự leo.

Tổng thời gian thi công phần thân:

- Phương án truyền thống: khoảng 135 ngày.
- Phương án tích hợp tự động hóa: khoảng 99 ngày.

Như vậy tiến độ được rút ngắn khoảng 36 ngày, tương đương 26-27%.

Năng suất thi công trung bình tăng từ khoảng 220 m²/ngày lên hơn 300 m²/ngày.

Số lượng nhân công trực tiếp giảm từ khoảng 45 người xuống còn khoảng 30 người cho mỗi tầng thi công.

5. XÂY DỰNG MÔ HÌNH NĂNG SUẤT LAO ĐỘNG

Năng suất thi công tầng được biểu diễn:

$$P = \frac{A}{T}$$

Trong đó: P - năng suất (m²/ngày); A - diện tích sàn tầng (A = 1000 m²); T - chu kỳ thi công tầng

$$P_{trad} = \frac{1000}{4,5} = 222 \text{ (m}^2\text{/ngày)}$$

$$P_{auto} = \frac{1000}{3,3} = 303 \text{ (m}^2\text{/ngày)}$$

Mức cải thiện năng suất khi tích hợp tự động hóa:

$$\Delta P = \frac{P_{auto} - P_{trad}}{P_{trad}} = \frac{303 - 222}{222} \approx 36,5\%$$

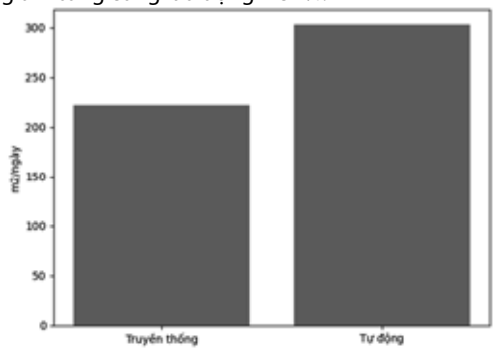
Trong đó: P_{auto} - năng suất tự động hóa; P_{trad} - năng suất truyền thống.

Số nhân công trung bình/tầng:

Bảng 2. So sánh năng suất lao động

Phương án	Nhân công	Công/ngày	Tổng công/tầng
Nhôm thường	45 người	4,5 ngày	202,5 công
Tự leo	30 người	3,3 ngày	99 công

Mức giảm tổng công lao động ≈ 51%.



Hình 3. So sánh năng suất thi công

6. PHÂN TÍCH CHI PHÍ VÒNG ĐỜI (LCC)

$$LCC = C_0 + \sum \frac{C_m - C_0}{(1+r)^t} - \frac{SV}{(1+r)^n}$$

Giả định: C_{0_trad} = 20 tỷ; C_{0_auto} = 25 tỷ; C_m ≈ 0,5 tỷ/năm; r = 10%.

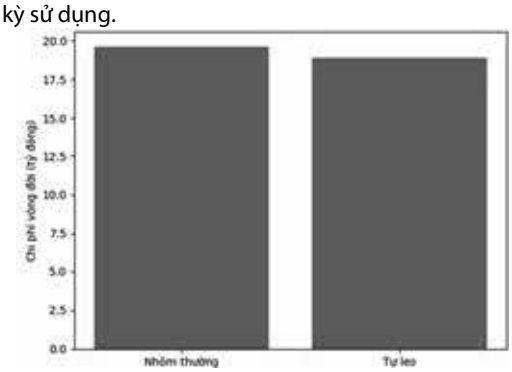
Tuổi thọ khai thác: 5 năm (2 dự án lớn)

Giá trị thu hồi (SV): SV_{trad} = 5 tỷ; SV_{auto} = 8 tỷ.

Kết quả tính toán chiết khấu:

LCC_{trad} ≈ 19,6 tỷ; LCC_{auto} ≈ 18,9 tỷ

→ Phương án tự động hóa có chi phí vòng đời thấp hơn khi xét đủ chu kỳ sử dụng.



Hình 4. So sánh chi phí vòng đời

7. PHÂN TÍCH TÀI CHÍNH DỰA TRÊN GIÁ TRỊ HIỆN TẠI THUẦN (NPV)

Lợi ích tài chính gồm:

- Tiết kiệm lãi vay nhờ rút ngắn tiến độ
- Giảm chi phí nhân công
- Giảm chi phí hoàn thiện bề mặt

Giá trị hiện tại thuần (NPV): NPV = $\sum \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$

Trong đó: B_t - lợi ích năm t; C_t - chi phí năm t; r - lãi suất chiết khấu.

Hệ thống được xem là hiệu quả khi NPV > 0.

Tổng vốn phần thân: 240 tỷ; Lãi suất r = 10%; Thời gian rút ngắn = 36 ngày; Tiết kiệm lãi vay: S_1 = 240 × 0,10 × (36/365) ≈ 2,37 tỷ

Giảm chi phí nhân công (6 tỷ × 35%) ≈ 2,1 tỷ

Giảm chi phí hoàn thiện (1,5% giá trị phần thô ≈ 3,6 tỷ × 15%) ≈ 0,54 tỷ

Tổng lợi ích: 5,01 tỷ

Chi phí bổ sung đầu tư: 5 tỷ

$$NPV = \frac{5,01}{(1+0,1)^1} - 5 = 4,55 - 5 = -0,45 \text{ (1 dự án)}$$

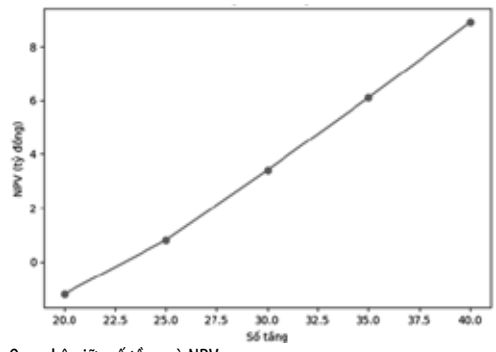
Nếu sử dụng cho 2 dự án liên tiếp:

$$NPV_2 = \frac{5,01}{(1,1)^1} + \frac{5,01}{(1,1)^2} - 5 = 4,55 + 4,14 - 5 = 3,69 \text{ (tỷ) } > 0$$

→ Điểm hòa vốn đạt từ dự án thứ hai.

Bảng 3. Phân tích NPV theo số tầng

Số tầng	NPV (tỷ)
20	-1.2
25	0.8
30	3.4
35	6.1
40	8.9



Hình 5. Quan hệ giữa số tầng và NPV

Đường cong NPV theo số tầng

Biểu đồ thể hiện quan hệ phi tuyến giữa số tầng và NPV. Điểm hòa vốn đạt tại khoảng 18-20 tầng. Sau 30 tầng, biên lợi ích tăng nhanh do hiệu ứng quy mô. Hệ thống này mang lại lợi nhuận vượt trội từ dự án thứ hai hoặc đối với các tòa nhà có quy mô trên 25 tầng.

Phân tích tài chính được thực hiện dựa trên mô hình NPV với giả định chi phí đầu tư bổ sung cho hệ tự động hóa là 5 tỷ đồng.

Các lợi ích tài chính bao gồm:

- Tiết kiệm chi phí lãi vay do rút ngắn tiến độ.
- Giảm chi phí nhân công.
- Giảm chi phí hoàn thiện bề mặt bê tông.

Kết quả tính toán cho thấy:

Tổng lợi ích kinh tế khoảng 5,01 tỷ đồng cho mỗi dự án quy mô 30 tầng.

Khi hệ cốp pha được tái sử dụng cho hai dự án liên tiếp, giá trị NPV đạt giá trị dương rõ rệt, cho thấy tính khả thi về mặt đầu tư công nghệ.

8. PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY VÀ MÔ PHỎNG MONTE CARLO ĐỂ ĐÁNH GIÁ RỦI RO ĐẦU TƯ

8.1. Mô hình hồi quy đa biến dựa trên bộ dữ liệu giả lập (n = 1000)

8.1.1. Thiết kế bộ dữ liệu mô phỏng

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng đồng thời của các biến kỹ thuật - kinh tế đến hiệu quả tài chính (NPV), nghiên cứu xây dựng bộ dữ liệu giả lập gồm 1000 quan sát bằng phương pháp Monte Carlo. Các biến đầu vào được phân bố như sau:

- X_1: Năng suất thi công (m^2/ngày), phân bố chuẩn N (μ = 280, σ = 25)
- X_2: Chi phí đầu tư ban đầu (tỷ đồng), phân bố chuẩn N (μ = 3,5; σ = 0,4)
- X_3: Tỷ lệ tái sử dụng (%), phân bố chuẩn N (μ = 180; σ = 20)

- X_4: Số tầng công trình, phân bố rời rạc U (15-45)
- X_5: Hệ số học tập (learning rate), phân bố chuẩn N ($\mu = 0,92$; $\sigma = 0,03$)

Biến phụ thuộc:
- Y: Giá trị hiện tại ròng (NPV, tỷ đồng)

8.1.2. Mô hình hồi quy tuyến tính đa biến

Dạng tổng quát:

$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_4X_4 + \beta_5X_5 + \varepsilon$

Kết quả ước lượng (OLS) từ dữ liệu mô phỏng cho thấy:

$Y = -4,82 + 0,015X_1 - 1,12X_2 + 0,021X_3 + 0,084X_4 + 2,65X_5$

Hệ số xác định $R^2 = 0,87$; F-test ($p < 0,001$)

Diễn giải học thuật:
- X_4 (số tầng) có tác động dương mạnh nhất đến NPV
- X_2 (chi phí đầu tư) có hệ số âm lớn, ảnh hưởng nghịch chiều
- X_5 (learning rate) thể hiện vai trò của kinh nghiệm tổ chức thi công

8.1.3. Biểu diễn mô hình dưới dạng ma trận

Mô hình hồi quy được biểu diễn dưới dạng đại số tuyến tính:

$Y = X\beta + \varepsilon$

Trong đó:

Y (1000×1) = vector giá trị NPV; X (1000×6) = ma trận biến độc lập (bao gồm cột 1 cho hệ số chặn); β (6×1) = vector hệ số hồi quy; ε (1000×1) = vector sai số

Ước lượng OLS: $\hat{\beta} = (X^TX)^{-1}X^TY$

Ma trận hiệp phương sai:

$Var(\beta) = \sigma^2 (X^TX)^{-1}$

Cách biểu diễn này cho phép mở rộng sang mô hình Ridge hoặc Lasso khi xử lý đa cộng tuyến.

8.2. Phân tích độ nhạy đa biến

Biến đầu vào:
- N (số tầng): 20-40
- r (lãi suất): 8-15%
- Giảm nhân công: 20-40%
- ΔC_0 (Chi phí đầu tư): 3-7 tỷ

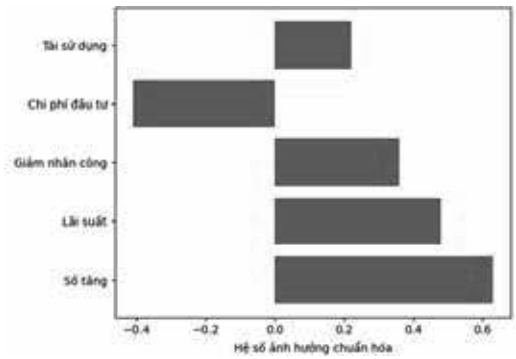
Kết quả mô phỏng 1000 kịch bản cho thấy:

Xác suất NPV > 0:
- Công trình 20 tầng: 32%
- Công trình 25 tầng: 58%
- Công trình 30 tầng: 81%
- Công trình 35 tầng: 93%

Hệ số ảnh hưởng (theo phân tích hồi quy chuẩn hóa β):

Bảng 4. Phân tích độ nhạy các biến

Biến	Hệ số ảnh hưởng
Số tầng	0.63
Lãi suất	0.48
Giảm nhân công	0.36
Chi phí đầu tư	-0.41
Tái sử dụng	0.22



Hình 6. Phân tích độ nhạy các biến ảnh hưởng NPV

Phân tích độ nhạy các biến

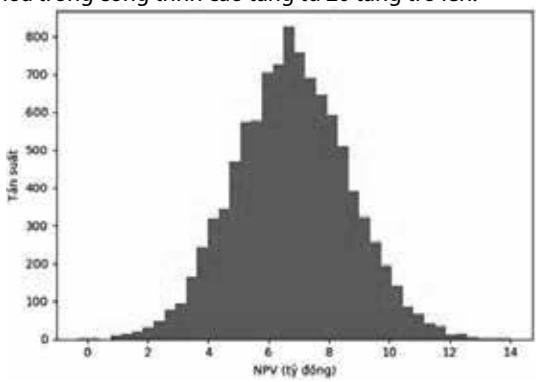
Thứ tự mức ảnh hưởng (từ lớn đến nhỏ):
- Số tầng
- Lãi suất
- Giảm nhân công
- Chi phí đầu tư
- Tái sử dụng

Biểu đồ cho thấy biến "số tầng" có biên độ dao động NPV lớn nhất.

8.3. Mô phỏng Monte Carlo (n = 10.000)

Phân phối NPV có dạng gần chuẩn lệch phải nhẹ.
- Giá trị trung bình: 6,84 tỷ đồng
- Độ lệch chuẩn: 1,92 tỷ đồng
- Xác suất NPV > 0: 96,3%

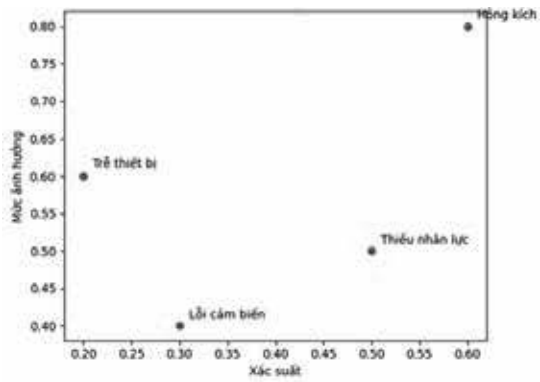
Kết quả củng cố tính khả thi tài chính của hệ cốp pha nhôm tự động hóa trong công trình cao tầng từ 20 tầng trở lên.



Hình 7. Phân phối NPV mô phỏng Monte Carlo

Bảng 5. Ma trận rủi ro hệ cốp pha tự leo

Rủi ro	Xác suất	Mức ảnh hưởng	Mức rủi ro
Hỏng hệ kích thủy lực	Trung bình	Cao	Cao
Sai lệch đồng bộ cảm biến	Thấp	Trung bình	Trung bình
Thiếu nhân lực vận hành	Trung bình	Trung bình	Trung bình
Trễ cung cấp thiết bị	Thấp	Cao	Trung bình
Lỗi phần mềm điều khiển	Thấp	Trung bình	Thấp



Hình 8. Ma trận đánh giá rủi ro

Nghiên cứu xây dựng ma trận rủi ro dựa trên hai tiêu chí: xác suất xảy ra và mức độ ảnh hưởng.

Các rủi ro chính gồm:
- Sự cố hệ thống kích thủy lực.
- Sai lệch dữ liệu cảm biến.

- Thiếu nhân lực vận hành thiết bị.
- Trễ cung cấp thiết bị.

Kết quả phân tích cho thấy rủi ro kỹ thuật chủ yếu tập trung trong giai đoạn đầu triển khai công nghệ.

Tuy nhiên các rủi ro này có thể được kiểm soát thông qua đào tạo nhân lực, chuẩn hóa quy trình vận hành và tăng cường kiểm soát kỹ thuật.

9. THẢO LUẬN VÀ SO SÁNH QUỐC TẾ

9.1. So sánh với các nghiên cứu tại Hàn Quốc và Nhật Bản

Các nghiên cứu tại Hàn Quốc cho thấy hệ cốp pha tự leo (SCF) giúp rút ngắn chu kỳ tầng xuống còn 3,0-3,5 ngày đối với nhà trên 40 tầng. Kim và Park ghi nhận mức tăng năng suất 28-35% khi tích hợp cơ cấu kích thủy lực đồng bộ và kiểm soát số hóa [3]. Kết quả nghiên cứu hiện tại (tăng 30-36%) nằm trong cùng khoảng giá trị, cho thấy tính tương thích về mặt kỹ thuật.

Tại Nhật Bản, các dự án cao tầng ứng dụng robot hỗ trợ lắp dựng và hệ sàn công nghiệp hóa (Shimizu, Kajima) cho thấy tác động mạnh hơn đến độ ổn định chất lượng và an toàn lao động hơn là trực tiếp đến NPV. Tanaka [4] nhấn mạnh vai trò của tự động hóa trong giảm biến động năng suất (productivity variance), một yếu tố ít được lượng hóa tại Việt Nam. Điều này gợi mở hướng nghiên cứu tiếp theo về mô hình hóa độ lệch chuẩn năng suất thay vì chỉ giá trị trung bình.

9.2. So sánh với châu Âu và Hoa Kỳ

Tại châu Âu, xu hướng industrialized construction tập trung vào tiền chế hóa (prefabrication) và mô-đun hóa hơn là cải tiến hệ cốp pha truyền thống. Couto, J. P., & Teixeira, J. C. [1] và Gann [6] cho rằng hiệu quả kinh tế chỉ đạt tối ưu khi chuỗi cung ứng được tích hợp đồng bộ. So với bối cảnh đó, thị trường Việt Nam chưa đạt mức tích hợp chuỗi giá trị cao, nên hiệu quả tài chính phụ thuộc nhiều hơn vào quy mô tầng và lãi suất vốn vay.

Tại Hoa Kỳ, Teicholz [7] chỉ ra rằng năng suất ngành xây dựng tăng chậm hơn nhiều so với công nghiệp chế tạo. Ứng dụng SCF và robot xây dựng được xem là một trong các giải pháp thu hẹp khoảng cách này. Tuy nhiên, mức chi phí lao động cao tại Mỹ làm cho thời gian hoàn vốn ngắn hơn đáng kể so với Việt Nam. Điều này giải thích vì sao trong nghiên cứu hiện tại, NPV chỉ dương rõ rệt từ dự án thứ hai trở đi.

9.3. Ý nghĩa thực tiễn tại Việt Nam

So sánh quốc tế cho thấy ba điểm khác biệt chính:

- Ở các nước phát triển, động lực chính là giảm chi phí lao động và tăng an toàn.
- Tại Việt Nam, động lực chính là rút ngắn tiến độ và tối ưu chi phí tài chính.
- Mức độ tích hợp số hóa (BIM 4D/5D, IoT) quyết định độ bền vững dài hạn của mô hình.

So với nghiên cứu của Kim và Park [3], mức tăng năng suất tại Việt Nam tương đương nhưng lợi ích tài chính phụ thuộc nhiều hơn vào lãi suất vốn vay. Điều này phản ánh đặc thù thị trường vốn trong nước.

Việc tích hợp BIM 4D và IoT giúp giảm bất định trong quản lý tiến độ, phù hợp định hướng chuyển đổi số ngành xây dựng.

10. KẾT LUẬN

- Hệ cốp pha nhôm tích hợp tự leo giúp giảm chu kỳ thi công tầng từ 4.5 xuống 3.3 ngày, tương đương 26-30%.
- Năng suất lao động tăng 34-36% và nhu cầu lao động trực tiếp giảm khoảng 35-50%.
- Phân tích tài chính cho thấy điểm hòa vốn đạt ở 23-25 tầng, trong khi các công trình ≥30 tầng mang lại NPV dương rõ rệt.
- Phân tích độ nhạy chỉ ra quy mô công trình và lãi suất vốn vay là hai biến ảnh hưởng lớn nhất.
- Ma trận rủi ro cho thấy rủi ro chính tập trung vào hệ thống kích thủy lực và năng lực vận hành, có thể kiểm soát bằng đào tạo và chuẩn hóa quy trình.

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng hệ cốp pha nhôm tích hợp tự leo và tự động hóa có khả năng cải thiện đáng kể năng suất thi công, rút ngắn tiến độ và nâng cao hiệu quả kinh tế trong các dự án nhà cao tầng. Phân tích tài chính chỉ ra rằng hiệu quả đầu tư phụ thuộc mạnh vào quy mô công trình và tần suất tái sử dụng hệ thống cốp pha.

Đối với các dự án có quy mô từ 25 tầng trở lên, hệ thống tự động hóa có khả năng mang lại giá trị NPV dương rõ rệt và góp phần thúc đẩy quá trình công nghiệp hóa ngành xây dựng tại Việt Nam.

11. KIẾN NGHỊ

- Kiến nghị Bộ Xây dựng ban hành các tiêu chuẩn kỹ thuật riêng cho hệ cốp pha tự động hóa.
- Khuyến khích đưa việc ứng dụng công nghệ này vào tiêu chí đánh giá năng lực nhà thầu trong các dự án trọng điểm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Couto, J. P., & Teixeira, J. C. . The evolution of the learning curve in the construction industry. Organization, Technology and Management in Construction, Vol. 1, No. 2, 2005.

[2] Richard, R. J. . Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. Automation in Construction, Vol. 14, No. 2, pp. 229-243, 2005.

[3] Kim, M. S., Park, M. S., Lee, H. S., & Kim, J. H. . Productivity Analysis of Self-Climbing Formwork System Using Simulation Technology. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 13(4), pp. 385-395, 2013.

[4] Tanaka, S.. Robotized construction: Its contribution to labor-saving and productivity improvement. Proceedings of the 10th ISARC, Haifa, Israel, 1993.

[5] Bộ Xây dựng. Chiến lược phát triển ngành Xây dựng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2021.

[6] Gann, D. M. . Building Innovation: Complex Constructs in a Changing World. Thomas Telford Publishing, London, 2000.

[7] Teicholz, P. . Labor Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies. AECbytes Viewpoint, No. 67, 2000.

[8] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. . BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3rd Edition, Wiley, 2018.

[9] Pan, W., & Sidwell, R. . Demystifying the cost barriers to offsite construction in the UK. Construction Management and Economics, 29 (11), pp. 1081-1099, 2011.

[10] Skibniewski, M. J. . Robotics in Civil Engineering. Carnegie Mellon University Press, 1988.

■Ngày nhận bài: 31/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/4/2026

Phát triển mô hình khái niệm cho thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường: Một nghiên cứu Delphi

Developing a Conceptual model for Circular economy practices on construction sites: A Delphi study

> **THS NGUYỄN LÊ MINH LONG[1]; PGS.TS LƯU TRƯỜNG VĂN[2,*]**
[1]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh; Email: long.nlm@ou.edu.vn
[2]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh; *Email: van.luu@ou.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này phát triển một mô hình khái niệm tích hợp công trường tinh gọn (Lean) với khung công nghệ - tổ chức môi trường (TOE) nhằm hỗ trợ thực hành kinh tế tuần hoàn (CE) trên công trường xây dựng tại các quốc gia đang phát triển. Từ tổng quan tài liệu, nghiên cứu xây dựng danh mục biến ban đầu và sàng lọc bằng phỏng vấn Delphi bán cấu trúc nhiều vòng, kết hợp tiêu chí đồng thuận KAMET để đánh giá mức độ phù hợp và tính khả thi tại hiện trường. Kết quả giữ lại 40 biến, gồm 33 biến điều kiện/thực hành và 7 biến kết quả; đồng thời loại 3 biến được chuyên gia thống nhất là khó duy trì trong bối cảnh công trường Việt Nam. Mô hình đề xuất nhấn mạnh các nội dung có thể triển khai thực tế tại hiện trường, cung cấp bộ biến khả thi cho các bên liên quan và làm nền tảng cho kiểm định định lượng trên mẫu lớn ở giai đoạn tiếp theo.

Từ khóa: Công trường tinh gọn; công trường xây dựng; kinh tế tuần hoàn; phương pháp Delphi.

ABSTRACT

This study develops a site-level conceptual framework that integrates lean thinking with Technology-Organization-Environment (TOE) conditions to support circular economy (CE) practices on construction sites in developing countries, with Vietnam as the focal context. An initial pool of variables was developed from the literature and refined through multi-round semi-structured Delphi interviews using the KAMET consensus criteria to assess relevance and on-site feasibility. The final framework retains 40 variables, including 33 enabling/practice variables and 7 outcome indicators, while excluding 3 variables considered difficult to sustain on typical Vietnamese construction sites. The proposed framework emphasizes practically implementable site-level actions, offers a feasible set of variables for construction stakeholders, and provides a basis for subsequent large-sample empirical validation.

Keywords: Lean construction; construction sites; circular economy; Delphi method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành Xây dựng ở các nước đang phát triển vừa thúc đẩy hạ tầng, đô thị hóa, vừa tạo nhiều việc làm, nhưng ở cấp công trường vẫn tồn tại thất thoát năng suất và "điểm nghẽn" phối hợp giữa các bên (Long & Luu, 2025). Đứt gãy thông tin và thiếu đồng bộ kế hoạch - cung ứng - triển khai làm gián đoạn thi công, phát sinh chi phí ẩn (Nguyen, Do, et al., 2025). Cách quản lý theo kinh nghiệm và mệnh lệnh vì vậy bộc lộ giới hạn, nhất là trước yêu cầu giảm lãng phí, kiểm soát chi phí và tiến độ.

Một áp lực khác là chất thải và phá dỡ chiếm khoảng 30% lượng chất thải toàn cầu, gây gánh nặng chi phí cho nhà thầu và rủi ro môi trường. Trong bối cảnh đó, kinh tế tuần hoàn chuyển trọng tâm từ "thải bỏ" sang kéo dài vòng đời và tái tạo giá trị tài nguyên, đồng thời mở ra "chiến lược kép" cho các nước đang phát triển: giảm lãng phí, cải thiện chi phí và giảm tác động môi trường (Nguyen, Nguyen, et al., 2025).

Công trường tinh gọn hỗ trợ hướng này thông qua việc loại bỏ lãng phí, ổn định dòng công việc và cải thiện phối hợp (Xing et al., 2021). Tuy nhiên, hiệu quả Lean khác nhau giữa các dự án vì phụ thuộc vào mức sẵn sàng công nghệ, năng lực tổ chức và áp lực môi trường (Fang & Gao, 2024). Khung TOE giúp lý giải sự khác biệt này qua ba nhóm điều kiện: công nghệ, tổ chức và môi trường (Katebi et al., 2022; Low et al., 2022; Xue et al., 2023).

Dưới góc nhìn CE, đóng góp bền vững của Lean được thể hiện qua việc gắn các thực hành công trường với chiến lược 7R: Refuse/Rethink, Reduce, Reuse/Refurbish, Repair/Remanufacture, Repurpose và Recycle/Recover (Bertino et al., 2021). Trong quản lý xây dựng, nhiều nghiên cứu gần đây dùng các kỹ thuật định lượng tiên tiến để kiểm định những mô hình có nhiều biến và quan hệ đan xen; bằng chứng về tương tác Lean-TOE và tác động đến Lean Site Effectiveness (LSE) ở các nước đang phát triển vẫn hạn chế (Evans et al., 2021). Vì vậy, nghiên cứu

xây dựng khung tích hợp Lean-TOE cho CE tại công trường, qua đó đề xuất các "đòn bẩy" can thiệp khả thi khi nguồn lực hạn chế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Các khái niệm và dòng nghiên cứu thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường

Công trường tinh gọn (Lean Construction - LC) là cách tiếp cận quản trị sản xuất - thi công nhằm tối đa hóa giá trị theo yêu cầu của khách hàng thông qua việc ổn định luồng công việc, giảm biến động và loại bỏ lãng phí trong thi công (Fadeyi, 2021). Trong LC, "giá trị" được hiểu là mức độ đáp ứng thiết kế và tiêu chuẩn, đồng thời bao gồm độ tin cậy tiến độ, chất lượng bàn giao, an toàn và hiệu quả phối hợp liên ngành. Ngược lại, các hoạt động không tạo giá trị là những thao tác, thời gian chờ hoặc nguồn lực tiêu tốn nhưng không làm tăng giá trị đầu ra; phổ biến như chờ mặt bằng, chờ vật tư, di chuyển không cần thiết, thao tác thừa, tồn kho, sai lỗi và làm lại (Xing et al., 2021).

Hiệu quả tiến trình công việc phản ánh mức độ liên tục và ít gián đoạn từ chuẩn bị, thi công đến nghiệm thu. Nó phụ thuộc chủ yếu vào độ tin cậy của kế hoạch, phối hợp đồng bộ, cung ứng nguồn lực và kiểm soát lỗi để giảm làm lại, hơn là tối ưu năng suất cục bộ. Do đó, LC thường được hiện thực hóa thông qua kiểm soát sản xuất tại công đoạn gắn với sơ đồ dòng giá trị (Value Stream Mapping - VSM), "Pull planning", quản trị trực quan, kỷ luật hiện trường và cải tiến liên tục (Shooshtarian et al., 2023).

Hiệu quả vận hành công trường tinh gọn (Lean Site Effectiveness - LSE) phản ánh mức "vận hành Lean" ở cấp công trường, thể hiện ở năng lực vận hành hiệu quả, giảm lãng phí, phối hợp trơn tru giữa các bên và đáp ứng kỳ vọng bền vững - chất lượng; nhấn mạnh kỷ luật và tính bền vững của kiểm soát sản xuất. LSE vì thế đóng vai trò năng lực trung gian giúp chuyển thực hành LC thành kết quả hiệu suất/bền vững, nhất là khi điều kiện thi công biến động và nguồn lực hạn chế (Xing et al., 2021).

Kinh tế tuần hoàn trong xây dựng là định hướng quản trị tài nguyên nhằm duy trì giá trị vật liệu/cấu kiện lâu nhất, giảm tiêu thụ tài nguyên sơ cấp và giảm chất thải - phát thải trong toàn vòng đời công trình. CE được cụ thể hóa bằng 7R. Ở công trường, CE thể hiện qua quyết định về vật liệu, tổ chức thi công giảm hao hụt, phân loại-thu hồi-tái sử dụng và take-back/reverse logistics theo chuỗi cung ứng (Marchesini, 2025). Kết quả CE có thể được đo bằng tỷ lệ chuyển hướng chất thải, tỷ lệ tái sử dụng/tân trang tại chỗ, mức độ tách nguồn, tỷ lệ thu hồi và mức giảm chất thải nhờ ngăn ngừa làm lại (Meng & Cao, 2024; Wu, 2025).

Nghiên cứu này xác lập logic tích hợp LC-CE: LC là "hạ tầng quản trị vận hành", trong đó các thực hành LC làm tăng LSE thông qua ổn định tiến trình, giảm sai lỗi và tăng phối hợp; từ đó nâng kết quả CE mà không đánh đổi hiệu suất bàn giao (Bertino et al., 2021; Marsh et al., 2022; Victar & Waidyasekara, 2023). Nói cách khác, các công cụ như VSM, Last Planner System và Just-in-Time logistics có thể được gắn trực tiếp với các hành động 7R theo từng công tác hoặc dòng vật liệu (Xing et al., 2021).

Đồng thời, vận dụng khung TOE để lý giải điều kiện thúc đẩy/kìm hãm tiếp nhận đổi mới: Công nghệ như BIM, mô phỏng tiến độ 4D, IoT, ứng dụng hiện trường và các thuộc tính tương thích, liên thông, an toàn thông tin, chi phí (Katebi et al., 2022); tổ chức như cam kết lãnh đạo, năng lực, khuyến khích, học hỏi và quản trị thay đổi (Low et al., 2022; Wang & Zhang, 2025); và Môi trường như yêu cầu chủ đầu tư (CĐT), quy chuẩn-tiêu chuẩn, cạnh tranh và áp lực chuỗi cung ứng (Kwasafo et al., 2024; Nguyen et al., 2022; W. Wang et al., 2024). Theo đó, TOE được xem là điều kiện ngoại sinh tạo nền cho LSE và gián tiếp chi phối kết quả CE, đồng thời mở ra khả năng phân tích vai trò điều tiết giữa các bối cảnh dự án (Citybabu & Yamini, 2025; Evans et al., 2021).

2.2. Nhận dạng các nhân tố và thuộc tính tích hợp Lean-TOE cho thực hành CE trên công trường

Để lý giải khác biệt về kết quả Lean giữa các dự án, cần xét ngữ cảnh theo khung TOE (Nguyen et al., 2022; Xue et al., 2023). Ở cấp công trường, công nghệ như BIM-4D và ứng dụng hiện trường giúp tăng minh bạch, độ tin cậy của kế hoạch; tổ chức quyết định cam kết Lean thông qua lãnh đạo, năng lực và quản trị thay đổi; còn môi trường phản ánh áp lực pháp lý, khách hàng, cạnh tranh và chính sách xanh (Chen et al., 2025). Vì vậy, tiếp cận theo chuỗi Lean → LSE → kết quả CE, đồng thời xem TOE là điều kiện gián tiếp/điều tiết. Các thuộc tính đo lường bám vào PPC, tỷ lệ làm lại, lead time, tích hợp BIM/IoT và được tổng hợp ở Bảng 1.

Bảng 1. Các nhân tố và thuộc tính bên trong được nhận dạng thông qua khám phá các nghiên cứu trước

Nhân tố	Biến quan sát	Mã biến	Nguồn tham khảo
Năng lực công nghệ (TOE - TC)	Số hóa giám sát công trường theo thời gian thực	TC1	(Akindele et al., 2025)
	Tích hợp công nghệ số vào quy trình tinh gọn	TC2	(Citybabu & Yamini, 2025)
	Liên thông hệ thống công nghệ công trường	TC3	(Xue et al., 2023); (Wang et al., 2025)
	Chi phí sở hữu công nghệ phù hợp quy mô công trường	TC4	(Low et al., 2022); (Yu et al., 2024)
	An toàn và độ tin cậy nền tảng số công trường	TC5	(Khalid et al., 2024); (Kim et al., 2024)
	Năng lực triển khai và duy trì hệ thống số công trường	TC6	(Kayembe & Obadire, 2025)
Sự sẵn sàng tổ chức (TOE - OR)	Cam kết lãnh đạo và nguồn lực Lean-CE tại công trường	OR1	(Low et al., 2022); (Wang et al., 2025)
	Ủy quyền quyết định cho tổ đội tại hiện trường	OR2	(Xing et al., 2021)
	Năng lực áp dụng Lean của cán bộ/tổ đội công trường	OR3	(Fadeyi, 2021)
	KPI và khuyến khích theo PPC, làm lại, chất thải, an toàn và chất lượng	OR4	(Low et al., 2022)
	Phối hợp thiết kế-mua sắm-thi công và chia sẻ thông tin thống nhất	OR5	(Jiang et al., 2021); (Xing et al., 2021)
	Quản trị thay đổi khi triển khai số hóa và Lean tại công trường	OR6	(Wang et al., 2025)
Áp lực môi trường bên ngoài (TOE - EP)	Yêu cầu của chủ đầu tư về tiến độ, chi phí, chất lượng kèm tiêu chí xanh	EP1	(Kwasafo et al., 2024)
	Áp lực cạnh tranh thúc đẩy đổi mới công trường	EP2	(Bello et al., 2024)
	Quy chuẩn, tiêu chuẩn và chính sách về xanh/tuần hoàn	EP3	(Shi et al., 2024)
	Áp lực xã hội và truyền thông về công trình xanh, hiệu quả tài nguyên	EP4	(Osobajo et al., 2020)
	Kỳ vọng người sử dụng về bền vững và tuần hoàn của công trình	EP5	(Wuni & Shen, 2022)
	Biến động chuỗi cung ứng và rủi ro vật liệu (giá, thời gian cung ứng)	EP6	(Long & Luu, 2025)
Quản trị dòng giá trị (VM)	Lập sơ đồ dòng giá trị cho từng gói công việc chính	VM1	(Kayembe & Obadire, 2025)
	Loại bỏ có hệ thống các bước không tạo giá trị trong thi công	VM2	(Fadeyi, 2021)
	Chuẩn hóa công việc tạo giá trị theo quy trình thao tác chuẩn	VM3	(Xing et al., 2021)

	Rà soát sơ đồ dòng giá trị và cải tiến liên tục định kỳ	VM4	(Fadeyi, 2021)
	Tích hợp sơ đồ dòng giá trị với kế hoạch vật tư, nhân lực, hậu cần	VM5	(Jiang et al., 2021)
	Chia sẻ thông tin với các bên liên quan để phối hợp, minh bạch	VM6	(Kayembe & Obadire, 2025)
Thực hành TQM trên công trường (TQM)	Kiểm tra chất lượng theo từng hạng mục/công tác	TQM1	(Zaid et al., 2025)
	Sửa lỗi và ngừa tái lỗi sau sai sót	TQM2	(Walters & Helman, 2020)
	Theo dõi chất lượng bằng số liệu trên IoT, dashboard	TQM3	(Zaid et al., 2025)
	Huấn luyện quy trình kiểm tra chất lượng hiện trường (QA/QC)	TQM4	(Chen et al., 2025)
	Gắn kiểm tra chất lượng vào giao ban và kế hoạch tuần/ngày	TQM5	(Xing et al., 2021)
	Ghi nhận lỗi và xử lý theo quy trình chuẩn, cải tiến liên tục	TQM6	(Zaid et al., 2025)
Giảm lãng phí & hiệu quả tài nguyên (WR)	Giảm chờ nhờ lập kế hoạch thực tế và cân bằng khối lượng công việc	WR1	(Xing et al., 2021)
	Đặt vật tư đúng khối lượng, giảm dư thừa và phế liệu	WR2	(Marsh et al., 2022)
	Tối ưu di chuyển người và thiết bị trên công trường	WR3	(Jiang et al., 2021)
	Tái sử dụng và tân trang vật tư, thiết bị tạm tại công trường	WR4	(Shooshtarian et al., 2023)
	Phát hiện và sửa lỗi sớm để giảm làm lại	WR5	(Kim et al., 2024)
	Duy trì 5S và chuẩn hóa khu vực làm việc	WR6	(Victar & Waidyasekara, 2024)
Biến phụ thuộc: Hiệu lực vận hành công trường Lean (LSE)	Chi phí quản lý công trường trên m² thấp	LSE1	(Walters & Helman, 2020)
	Hiệu suất sử dụng nhân lực và thiết bị cao	LSE2	(Xing et al., 2021)
	Giám sát tài nguyên và chất thải	LSE3	(Jiang et al., 2021)
	Giảm xung đột thi công và thất thoát vật liệu	LSE4	(Xing et al., 2021)
	Mức hài lòng của các bên về hạng mục bền vững	LSE5	(C. Wang et al., 2024)
	Tỷ lệ chất thải chuyển hướng khỏi chôn lấp (%)	LSE6	(Shooshtarian et al., 2023)
	Tỷ lệ tái sử dụng và tân trang tại chỗ (%)	LSE7	(Victar & Waidyasekara, 2024)

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện theo hai giai đoạn. Giai đoạn một tổng quan tài liệu về Lean, TOE, CE và các nghiên cứu liên quan nhằm xác định bối cảnh, khoảng trống nghiên cứu, đồng thời nhận dạng sơ bộ các nhân tố và thuộc tính ảnh hưởng đến thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường. Giai đoạn hai sử dụng phỏng vấn Delphi bán cấu trúc để sàng lọc và hiệu chỉnh các thuộc tính thông qua ý kiến chuyên gia. Sau mỗi vòng Delphi, dữ liệu được đánh giá theo quy tắc KAMET, kế thừa từ Long and Luu (2025), gồm ba chỉ số: giá trị trung bình M_{qi}, độ lệch tứ phân vị Q_{qi} và chỉ số phân tán V_{qi}. Trong đó, q_i là biến thứ i, n là số chuyên gia, x_k là điểm đánh giá của chuyên gia thứ k, $\bar{X}$ là giá trị trung bình, còn Q_1 và Q_3 lần lượt là tứ phân vị 25% và 75%.

$$M_{qi} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \quad (1)$$

$$Q_{qi} = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2} \quad (2)$$

$$V_{qi} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Một thuộc tính được giữ lại khi $M_{qi} \geq 3.5$, $V_{qi} \leq 15\%$ và $Q_{qi} \leq 0.5$. Các thuộc tính chưa đạt đồng thuận được điều chỉnh hoặc tiếp tục đánh giá ở vòng Delphi kế tiếp. Kết quả cuối cùng là bộ thuộc tính được chuyên gia đồng thuận, làm cơ sở đề xuất mô hình khái niệm Lean-TOE cho thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường và phát triển các giả thuyết nghiên cứu.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Đặc điểm của các chuyên gia tham gia phỏng vấn bán cấu trúc bằng phương pháp Delphi

Nghiên cứu sử dụng Delphi kết hợp quy tắc KAMET để đạt đồng thuận của chuyên gia. Từ 45 chuyên gia tiềm năng, 17 người đồng ý tham gia, tương ứng với 37,78%, sau khi được thông báo về mục đích nghiên cứu và nguyên tắc bảo mật thông tin. Nhóm chuyên gia có kinh nghiệm thực tiễn khá vững, tất cả đều có trên 10 năm kinh nghiệm thi công và có hiểu biết nhất định về thực hành kinh tế tuần hoàn trên công trường. Về thành phần tham gia, nhóm chuyên gia bao gồm đại diện nhà thầu xây dựng, chủ đầu tư, tư vấn dự án, tư vấn giám sát và nhà cung cấp vật liệu; trong đó nhà thầu xây dựng chiếm tỷ lệ cao nhất với 35.29%, tiếp đến là tư vấn giám sát với 23.53%. Về thâm niên, 41.18% chuyên gia có 10-15 năm kinh nghiệm, 35.29% có 15-20 năm và 23.53% có hơn 20 năm. Về vị trí công tác gồm chỉ huy trưởng công trường, đội trưởng thi công, giám đốc ban quản lý dự án, kỹ sư tư vấn và trưởng bộ phận vật tư/mua sắm. Danh tính chuyên gia được ẩn danh trong toàn bộ quá trình Delphi nhằm hạn chế ảnh hưởng thứ bậc và tăng tính khách quan giữa các vòng đánh giá.

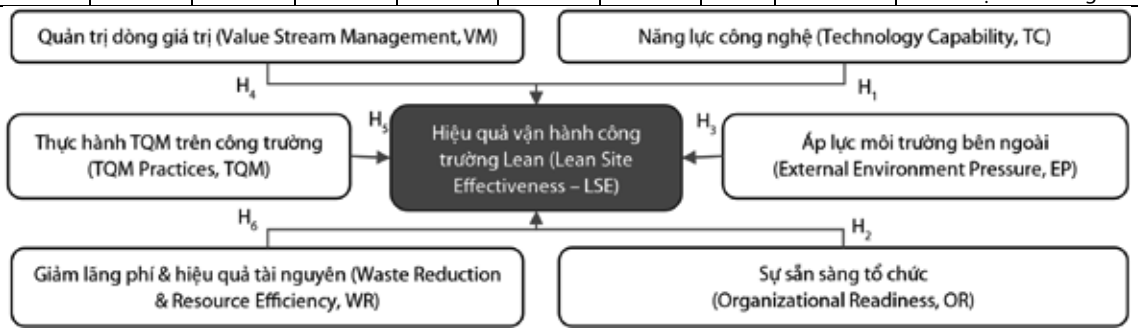
4.2. Kết quả các vòng Delphi

Quy trình phỏng vấn bán cấu trúc theo Delphi và quy tắc KAMET nhằm đạt đồng thuận của chuyên gia về tính phù hợp/khả thi của các biến trong mô hình cho bối cảnh công trường Việt Nam. Phản hồi được thu thập ẩn danh; kết quả vòng trước chỉ được tổng hợp ẩn danh để chuyên gia xem xét ở vòng sau. Dựa theo các quy tắc KAMET, vòng 1 giữ 31 biến, loại VM6 do Mqi = 3.12, phản ánh việc chia sẻ dữ liệu dòng giá trị với nhà cung ứng/nhà thầu phụ còn khó khả thi. 11 biến được chuyển sang vòng 2, giữ 05 biến: OR6, TQM4, WR1, WR5 và TQM2; loại VM1 do Mqi = 2.12, cho thấy lập sơ đồ dòng giá trị cho từng gói việc còn vượt quá điều kiện dữ liệu, thời gian và năng lực của nhiều công trường. 05 biến còn lại chuyển sang vòng 3, giữ OR4, VM3, VM4 và VM5; loại TQM3 do Mqi = 3.12, chủ yếu vì hạn chế về hạ tầng dữ liệu, thiết bị, chi phí và kỷ luật ghi nhận hiện trường. Kết quả cuối cùng giữ 40 biến, gồm 33 biến độc lập và 7 biến phụ thuộc; loại 03 biến: VM6, VM1 và TQM3. Chi tiết trình bày ở Bảng 2 và mô hình đề nghị ở Hình 1.

Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả phỏng vấn chuyên gia sử dụng phương pháp Delphi qua ba vòng

Mã biến	Delphi vòng 1			Delphi vòng 2			Delphi vòng 3			Kết quả cuối cùng
	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	M_{qi}	Q_{qi}	V_{qi} (%)	
TC1	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	Chấp nhận mà không cần vòng 2
TC2	4.12	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
TC3	4.06	0.00	6%	-	-	-	-	-	-	

TC4	4.12	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
TC5	4.12	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
TC6	3.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
OR1	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
OR2	3.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
OR3	3.88	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
OR5	3.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
EP1	4.00	0.00	13%	-	-	-	-	-	-	
EP2	4.88	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
EP3	4.94	0.00	6%	-	-	-	-	-	-	
EP4	4.94	0.00	6%	-	-	-	-	-	-	
EP5	4.18	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
EP6	4.88	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
VM2	4.00	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
TQM1	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
TQM5	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
TQM6	4.18	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
WR2	4.94	0.00	6%	-	-	-	-	-	-	
WR3	4.88	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
WR4	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
WR6	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
LSE1	4.18	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
LSE2	4.00	0.00	13%	-	-	-	-	-	-	
LSE3	4.88	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	
LSE4	4.00	0.00	13%	-	-	-	-	-	-	
LSE5	4.18	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
LSE6	4.82	0.00	15%	-	-	-	-	-	-	
LSE7	4.00	0.00	13%	-	-	-	-	-	-	
VM6	3.12	0.00	11%	-	-	-	-	-	-	Loại mà không cần vòng 2
OR6	4.29	0.50	22%	4.12	0.00	11%	-	-	-	Chấp nhận mà không cần vòng 3
TQM2	4.76	0.00	32%	4.88	0.00	11%	-	-	-	
TQM4	4.76	0.00	19%	4.82	0.00	15%	-	-	-	
WR1	4.06	0.00	18%	4.00	0.00	13%	-	-	-	
WR5	4.76	0.00	19%	4.82	0.00	15%	-	-	-	
VM1	2.24	0.00	19%	2.12	0.00	11%	-	-	-	Loại mà không cần vòng 3
OR4	4.65	0.50	24%	4.76	0.00	19%	4.82	0.00	15%	Chấp nhận mà không cần vòng 4
VM3	3.76	0.00	19%	3.76	0.00	19%	4.00	0.00	13%	
VM4	3.71	0.50	22%	3.76	0.00	19%	3.82	0.00	15%	
VM5	3.65	0.50	24%	3.71	0.50	22%	3.88	0.00	11%	
TQM3	3.47	0.50	26%	3.41	0.50	26%	3.12	0.00	11%	Loại mà không cần vòng 4



Hình 1. Mô hình nghiên cứu đề nghị

5. THẢO LUẬN, KHUYẾN NGHỊ

5.1. Thảo luận

Kết quả Delphi cho thấy mô hình Lean-CE theo khung TOE phù hợp với công trường Việt Nam vì dựa trên các việc có thể làm ngay: ổn định thi công, giảm chờ, làm lại, kiểm soát vật tư và chất lượng. Sau ba vòng, nghiên cứu giữ lại 33 biến độc lập và 7 biến phụ thuộc; loại 3 biến chưa khả thi là VM6, VM1 và TQM3. Các biến bị loại cho thấy ba điểm nghẽn chính: thiếu niềm tin chia sẻ dữ liệu với nhà cung ứng/nhà thầu phụ, thiếu điều kiện duy trì VSM theo từng gói việc, và hạn chế về dữ liệu, thiết bị, chi phí khi dùng dashboard/IoT. Nhìn chung, TOE tạo điều kiện nền, còn Lean/LSE là cơ chế vận hành giúp CE đi vào thực tế công trường.

5.2. Khuyến nghị

Nhà thầu nên bắt đầu từ các việc: chuẩn hóa công việc, giảm làm lại, quản trị vật tư đúng khối lượng, duy trì 5S và kiểm soát chất lượng. Khi vận hành ổn định, các mục tiêu CE như giảm phế liệu, tái sử dụng vật tư tạm và thu hồi chất thải sẽ dễ đạt hơn. Chủ đầu tư và tư vấn cần lồng ghép yêu cầu CE vào hợp đồng và quy trình phối

hợp ở mức khả thi, đồng thời giảm thay đổi thiết kế, giảm xung đột giữa thiết kế - mua sắm - thi công để hạn chế làm lại. Cơ quan quản lý nên ban hành hướng dẫn theo lộ trình, hỗ trợ hệ sinh thái thu hồi - tái chế và khuyến khích đo lường bằng các chỉ tiêu như tỷ lệ chuyển hướng chất thải, tỷ lệ tái sử dụng tại chỗ.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tổng quan tài liệu, xây dựng danh mục biến, thực hiện Delphi và sàng lọc bằng KAMET để hoàn thiện mô hình khái niệm với 40 biến và loại bỏ 3 biến chưa khả thi tại Việt Nam.

Đóng góp chính là thiết lập mạch TOE - Lean - LSE - kết quả CE, qua đó làm rõ vai trò trung gian của hiệu quả vận hành công trường. Về thực tiễn, mô hình giúp nhà thầu ưu tiên ổn định thi công, giảm làm lại, quản trị vật tư, kiểm soát chất lượng, rồi nâng dần số hóa. Hạn chế là Delphi chủ yếu phản ánh đánh giá khả thi; nghiên cứu tiếp theo nên kiểm định bằng mẫu lớn và phân tích khác biệt theo quy mô nhà thầu, mức sẵn sàng số.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ cho nghiên cứu này. Nghiên cứu là sản phẩm thuộc đề tài cấp cơ sở mã số T2025.02.2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Akindele, O., Ajayi, S., Oyegoke, A. S., Alaka, H. A., & Omotayo, T. Application of Geographic Information System (GIS) in construction: a systematic review. Smart and Sustainable Built Environment, 14(1), 210-236, 2025. https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2023-0016

[2] Bello, A. O., Okanlawon, T. T., Gbenga, P. O., Abdulraheem, A. A., & Olagoke, O. T. Critical success factors (CSFs) for the implementation of distributed ledger technology (DLT) in the Nigerian construction industry. Construction Innovation, ahead-of-print, 2024. https://doi.org/10.1108/CI-12-2023-0314

[3] Bertino, G., Kisser, J., Zeilinger, J., Langergraber, G., Fischer, T., & Österreicher, D. Fundamentals of building deconstruction as a circular economy strategy for the reuse of construction materials. Applied Sciences, 11(3), 2021. https://doi.org/10.3390/app11030939

[4] Chen, X., Chang-Richards, A. Y., Ling, F. Y. Y., Yiu, T. W., Pelosi, A., & Yang, N. Digital technology-enabled AEC project management: practical use cases, deployment patterns and emerging trends. Engineering, Construction and Architectural Management, 32(6), 4125-4154, 2025. https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2023-0962

[5] Citybabu, G., & Yamini, S. Essential skills for Lean Six Sigma 4.0 implementation: insights from a TOE-based mixed-method analysis. IEEE Transactions on Engineering Management, 1-14, 2025. https://doi.org/10.1109/tem.2025.3597131

[6] Evans, M., Farrell, P., Elbeltagi, E., & Dion, H. Competency framework to integrate lean construction and integrated project delivery on construction megaprojects. Benchmarking: An International Journal, 29(6), 1913-1956, 2021. https://doi.org/10.1108/bij-02-2021-0066

[7] Fadeyi, M. O. The importance of integrating lean thinking with digital solutions adoption for sustainable building delivery. In J. Ren (Ed.), Methods in Sustainability Science, 365–390, 2021. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00002-7

[8] Fang, Y., & Gao, S. Construction 4.0 technology and lean construction ambidexterity capability in China's construction industry. Construction Innovation, ahead-of-print, 2024. https://doi.org/10.1108/CI-12-2023-0302

[9] Jiang, W., Ding, L., & Zhou, C. Cyber physical system for safety management in smart construction site. Engineering, Construction and Architectural Management, 28(3), 788-808, 2021. https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0578

[10] Katebi, A., Homami, P., & Najmeddin, M. Acceptance model of precast concrete components based on TAM and TOE framework. Journal of Building Engineering, 45, 103518, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103518

[11] Kayembe, M. T., & Obadire, A. M. Navigating the transformation: BIM, AI and IoT in smart construction logistics. Modern Supply Chain Research and Applications, ahead-of-print, 2025. https://doi.org/10.1108/MSCRA-07-2024-0027

[12] Khalid, M. A., Hassan, M. U., Ullah, F., & Ahmed, K. Integrated BIM and blockchain system for decentralized progress payments. Journal of Engineering, Design and Technology, ahead-of-print, 2024. https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2024-0252

[13] Kim, D., Yang, J., Lee, D., Lee, D., Rahimian, F., & Park, C. Blockchain-enhanced computer vision for remote safety inspection. Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print, 2024. https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2024-0385

[14] Kwasafo, O. K., Adinyira, E., & Agyekum, K. Impact of green construction procurement on circular economy success in Ghana. Built Environment Project and Asset Management, 14(5), 765-781, 2024. https://doi.org/10.1108/bepam-06-2023-0109

[15] Long, N. L. M., & Luu, V. T. Evaluating contractors' sustainability productivity management using BSC. International Journal of Construction Management, 25(15), 1834-1846, 2025. https://doi.org/10.1080/15623599.2025.2485166

[16] Low, M. P., Seah, C. S., Cham, T.-H., & Teoh, S. H. Digitalization adoption in SMEs using TOE framework. Business Process Management Journal, 28(7), 1473-1494, 2022. https://doi.org/10.1108/bpmj-06-2022-0282

[17] Marchesini, G. Waste management system response after disaster: Roya Valley case. International Journal of Disaster Risk Reduction, 116, 105052, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.105052

[18] Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., & Bernal, S. A. Circular economy strategies for concrete. Journal of Cleaner Production, 362, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486

[19] Meng, F., & Cao, X. Intelligent framework for rework risk identification. Engineering, Construction and Architectural Management, 32(8), 5066-5098, 2024. https://doi.org/10.1108/ecam-06-2023-0645

[20] Nguyen, T. H., Le, X. C., & Vu, T. H. L. Extended TOE framework for digital transformation in Vietnam. Journal of Open Innovation, 8(4), 2022. https://doi.org/10.3390/joitmc8040200

[21] Nguyen, T. T., Do, S. T., & Nguyen, V. T. Barriers to circular economy adoption in Vietnam construction. Construction Innovation, ahead-of-print, 2025. https://doi.org/10.1108/CI-02-2025-0068

[22] Nguyen, T. T., Nguyen, V. T., & Do, S. T. Systemic barriers to circular economy in construction. Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print, 1-21, 2025. https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2025-0770

[23] Osobajo, O. A., Oke, A., Omotayo, T., & Obi, L. I. A systematic review of circular economy in construction. Smart and Sustainable Built Environment, 11(1), 39-64, 2020. https://doi.org/10.1108/sasbe-04-2020-0034

[24] Shi, Q., Yu, J., Zhang, L., Wang, J., & Cheng, G. Evaluation of smart construction policies using PMC-index model. Engineering, Construction and Architectural Management, 33(1), 690-712, 2024. https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2024-0446

[25] Shooshtarian, S., Maqsood, T., Wong, P. S. P., et al. Circular economy in action: recycled content in construction projects. Smart and Sustainable Built Environment, 13(2), 370-394, 2023. https://doi.org/10.1108/sasbe-08-2023-0213

[26] Victar, H. C., & Waidyasekara, A. S. Optimising construction waste management in Sri Lanka. Engineering, Construction and Architectural Management, 2024. https://doi.org/10.1108/ecam-06-2023-0608

[27] Victar, H. C., & Waidyasekara, K. Circular economy strategies for waste management in Sri Lanka. Waste Management and Research, 2023. https://doi.org/10.1177/0734242X231206988

[28] Walters, D., & Helman, D. Productivity. In Strategic Capability Response Analysis. Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22944-3_6

[29] Wang, C., Xie, X., Shuai, C., et al. Green building practitioners' competition perceptions. International Journal of Construction Management, 1-13, 2024. https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2325752

[30] Wang, K., Xu, X., Mao, P., et al. Digital transformation and organizational readiness in SMEs. Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print, 2025. https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2025-0069

[31] Wang, S., & Zhang, H. Enhancing SMEs sustainable innovation via digital transformation. Socio-Economic Planning Sciences, 98, 2025. https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102124

[32] Wang, W., Hao, S., Zhong, H., & Sun, Z. Optimizing carbon emission reduction in construction supply chain. Journal of Construction Engineering and Management, 150(6), 2024. https://doi.org/10.1061/jcemd4.Coeng-13279

[33] Wu, Y. Identifying essential skills for circular economy workforce. Journal of Environmental Management, 393, 127237, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127237

[34] Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. Critical success factors for circular economy in modular construction. Sustainable Production and Consumption, 29, 574–587, 2022. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.010

[35] Xing, W., Hao, J. L., Qian, L., et al. Lean construction techniques in Chinese projects. Journal of Cleaner Production, 286, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124944

[36] Xue, H., Zhang, S., Wu, Z., & Zhang, L. Smart construction technology usage behavior based on TOE. Engineering, Construction and Architectural Management, 32(2), 785-804, 2023. https://doi.org/10.1108/ecam-07-2022-0631

[37] Yu, H., Deng, X., Zhang, N., & Zhang, X. Is blockchain cost-effective in construction project management? A systematic review from the perspective of transaction cost. Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print, 2024. https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2023-0604

[38] Zaid, A. A., Saleh, Y., Assaf, R., & Al-Tuhul, N. The effect of contract management systems on quality management systems in construction industry: the mediating role of Quality 4.0 technologies. International Journal of Quality & Reliability Management, ahead-of-print, 2025. https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2024-0357

■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 02/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2026

Nghiên cứu ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong kiểm soát nội bộ tại doanh nghiệp xây dựng

Research on applying the three lines of defense model to internal control in construction enterprises

> TS ĐỖ THỊ HUYỀN[1], THS VŨ VĂN HIỆP[2,*]
[1]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[2]Ban Quản lý dự án Đường sắt
[*]Email: vuvanhiep206@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu việc dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong kiểm soát nội bộ (KSNB) tại doanh nghiệp xây dựng (DNXD). Trên cơ sở phân tích lý luận và đặc thù hoạt động của DNXD, nghiên cứu làm rõ vai trò của từng lớp phòng vệ, cơ chế phối hợp, nguyên tắc ứng dụng, các điều kiện bảo đảm triển khai và kết quả kỳ vọng khi ứng dụng mô hình. Kết quả nghiên góp phần tăng cường nhận diện, kiểm soát rủi ro và củng cố hiệu lực KSNB, có ý nghĩa tham khảo cho DNXD trong quá trình cải tiến hệ thống KSNB.

Từ khóa: Mô hình ba lớp phòng vệ; kiểm soát nội bộ; doanh nghiệp xây dựng.

ABSTRACT

This paper examines the application of the three lines of defense model in the internal control systems of construction enterprises. Based on theoretical analysis and the specific operational characteristics of construction enterprises, the study clarifies the role of each line of defense, the coordination mechanisms, the principles of application, the conditions required for implementation and the expected outcomes of adopting the model. The findings contribute to enhancing risk identification and control while strengthening the effectiveness of internal control systems, thereby providing a useful reference for construction enterprises in improving their internal control frameworks.

Keywords: Three lines of defense model; internal control; construction enterprises.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

DNXD có đóng góp quan trọng trong phát triển kết cấu hạ tầng, góp phần thúc đẩy sự phát triển của nền kinh tế [13]. Theo số liệu thống kê năm 2025, GDP Việt Nam tăng 7,09%, trong đó khu vực công nghiệp và xây dựng tăng 8,33%, còn ngành Xây dựng tăng 9,62% [2]. Trong bối cảnh hiện nay, Nhà nước ưu tiên đầu tư cho hạ tầng, ngành Xây dựng sẽ tiếp tục khẳng định vị trí là động lực tăng trưởng quan trọng trong nền kinh tế. Vai trò ngày càng lớn này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc nâng cao năng lực và cải tiến hoạt động đối với các DNXD. Tuy nhiên, hoạt động sản xuất của DNXD khá phức tạp, phân tán theo công trường và chịu tác động của địa chất, thời tiết, vật tư, thiết bị, nhân lực, kỹ thuật và tiến độ hợp đồng. Đặc thù này làm gia tăng các rủi ro về chất lượng thi công, an toàn lao động, chi phí, thanh toán, quyết toán, nghĩa vụ hợp đồng và tuân thủ pháp luật [3, 4, 5, 6]. Nếu không được kiểm soát hiệu quả, các rủi ro này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả hoạt động và sự phát triển của DNXD. Vì vậy, tăng cường hiệu lực KSNB là yêu cầu tất yếu, trong đó mô hình ba lớp phòng vệ được xem là hướng tiếp cận phù hợp để làm rõ trách nhiệm kiểm soát, tăng cường quản trị rủi ro và nâng cao tính khách quan trong đánh giá hệ thống [5, 10].

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VỀ KSNB VÀ MÔ HÌNH BA LỚP PHÒNG VỆ

2.1. KSNB và hiệu lực KSNB trong doanh nghiệp

KSNB là một quá trình do nhà quản trị, ban điều hành và toàn thể nhân sự cùng thực hiện nhằm cung cấp sự bảo đảm hợp lý để đạt được các mục tiêu của đơn vị. Bản chất của KSNB là hệ thống tổng hợp các yếu tố như môi trường kiểm soát, đánh giá rủi ro, hoạt động kiểm soát, thông tin và truyền thông, giám sát [8].

Hiệu lực của KSNB là mức độ hệ thống thật sự phát huy chức năng hỗ trợ đạt mục tiêu, phòng ngừa và phát hiện rủi ro. Một hệ

thống có hiệu lực phải được vận hành thực chất, không chỉ tồn tại trên văn bản [5, 8]. COSO đưa ra ba tiêu chí để đánh giá tính hiệu lực của KSNB bao gồm kết quả hoạt động của doanh nghiệp; độ tin cậy của các báo cáo của doanh nghiệp; mức độ tuân thủ các quy định của pháp luật và nội quy của doanh nghiệp [8]. Nếu KSNB không đủ hiệu lực, các rủi ro sẽ khó được phát hiện kịp thời, dễ tích tụ, dẫn đến giảm năng lực cạnh tranh [3, 4, 8]. Khi thiếu tách bạch rõ ràng giữa thực hiện, kiểm soát, hỗ trợ và đánh giá, hệ thống dễ rơi vào tình trạng hình thức.

2.2. Mô hình ba lớp phòng vệ và mối quan hệ với hiệu lực KSNB

2.2.1. Mô hình ba lớp phòng vệ

Theo Viện Kiểm toán Nội bộ (IIA), mô hình ba lớp phòng vệ nhấn mạnh việc phân định vai trò và trách nhiệm của các chủ thể trong doanh nghiệp theo ba cấp độ khác nhau trong quản trị rủi ro (Hình 1) [10]. Trong đó, lớp phòng vệ thứ nhất bao gồm các đơn vị tác nghiệp, là tuyến đầu trực tiếp tạo ra và quản lý rủi ro thông qua việc tuân thủ quy trình, tự kiểm tra và báo cáo kịp thời các sự kiện phát sinh trong hoạt động hàng ngày. Lớp phòng vệ thứ hai gồm các bộ phận hỗ trợ, hướng dẫn nghiệp vụ và giám sát tính tuân thủ, nhằm tăng khả năng phòng ngừa cho lớp thứ nhất. Lớp phòng vệ thứ ba là bộ phận đánh giá độc lập về lớp thứ nhất và lớp thứ hai, báo cáo trực tiếp cho cấp cao nhất [10]. Sự kết hợp giữa trách nhiệm trực tiếp (lớp thứ nhất), giám sát chuyên môn (lớp thứ hai) và đánh giá độc lập (lớp thứ ba) tạo nên cơ chế kiểm soát đa tầng, giúp tối ưu hiệu lực KSNB trong doanh nghiệp.

Hình 1. Mô hình ba lớp phòng vệ

2.2.2. Mối quan hệ giữa mô hình ba lớp phòng vệ và hiệu lực KSNB

Xét trên ba tiêu chí đánh giá hiệu lực KSNB, mô hình ba lớp phòng vệ có mối quan hệ trực tiếp và tích cực với nâng cao hiệu lực KSNB trong doanh nghiệp [10]. Thứ nhất, mô hình ba lớp phòng vệ giúp doanh nghiệp tổ chức trách nhiệm kiểm soát ngay từ quá trình tác nghiệp. Lớp phòng vệ thứ nhất kiểm soát rủi ro tại nguồn, gắn với các hoạt động như thi công, quản lý vật tư, thiết bị, tiến độ và chi phí. Lớp phòng vệ thứ hai hỗ trợ bằng quy trình, hướng dẫn, giám sát và các chốt kiểm soát chuyên môn. Nhờ đó, doanh nghiệp hạn chế được sai sót, thất thoát và gián đoạn trong vận hành, từ đó nâng cao hiệu quả hoạt động. Thứ hai, mô hình này tạo ra cơ chế kiểm tra nhiều cấp đối với dữ liệu và thông tin quản trị. Lớp thứ nhất chịu trách nhiệm ghi nhận thông tin ban đầu; lớp thứ hai rà soát, đối chiếu và giám sát việc tuân thủ quy trình báo cáo; lớp thứ ba đánh giá độc lập chất lượng của toàn bộ hệ thống thông tin và kiểm soát. Cơ chế đó giúp giảm nguy cơ sai lệch, thiếu sót hoặc thiên lệch trong báo cáo, qua đó nâng cao tính trung thực và đáng tin cậy của thông tin phục vụ quản trị. Thứ ba, mô hình ba lớp phòng vệ giúp làm rõ ai chịu trách nhiệm thực hiện, ai chịu trách nhiệm giám sát và ai đánh giá độc lập việc tuân thủ. Nhờ sự phân định này, doanh nghiệp giảm tình trạng chồng chéo hoặc bỏ sót trách nhiệm, đồng thời tăng khả năng phát hiện sớm các vi phạm pháp luật và quy định nội bộ. Như vậy, mô hình ba lớp phòng vệ không chỉ là khuôn khổ phân công trách nhiệm, mà còn là cơ chế giúp doanh nghiệp thực hiện tốt hơn cả ba tiêu chí đánh giá hiệu lực KSNB theo COSO.

3. ĐẶC THÙ DNXD VÀ YÊU CẦU TĂNG CƯỜNG HIỆU LỰC KSNB

Sản phẩm của các DNXD thường là các công trình có quy mô lớn, giá trị đầu tư cao, thời gian thi công kéo dài, phạm vi thực hiện rộng và liên quan đến nhiều chủ thể như chủ đầu tư, tư vấn giám sát, nhà thầu phụ, nhà cung cấp và cơ quan quản lý nhà nước. Quá trình sản xuất phân tán theo nhiều công trường. Việc sử dụng vật tư, thiết bị, nhân lực và dòng tiền biến động theo từng giai đoạn thi công. Chính vì vậy, DNXD luôn phải vận hành trong môi trường có độ bất định cao và áp lực phối hợp lớn.

Những đặc thù này làm cho DNXD đối mặt với một phổ rủi ro rộng, gồm rủi ro tiến độ, rủi ro chất lượng công trình, rủi ro thất thoát tài sản, rủi ro chi phí và dòng tiền, rủi ro pháp lý hợp đồng, rủi ro an toàn lao động và rủi ro tuân thủ [1, 3, 5]. Đặc biệt, các rủi ro này không tồn tại riêng lẻ mà thường tác động dây chuyền: Chậm tiến độ có thể kéo theo tăng chi phí, sai lệch chất lượng có thể dẫn đến tranh chấp hợp đồng, còn thiếu kiểm soát vật tư và thiết bị có thể ảnh hưởng đồng thời đến hiệu quả tài chính và độ tin cậy của báo cáo.

Xét theo ba tiêu chí đánh giá hiệu lực KSNB, các đặc thù trên đặt ra yêu cầu kiểm soát rất cao đối với DNXD. Thứ nhất, về kết quả hoạt động, KSNB phải giúp DNXD sử dụng hiệu quả nguồn lực, hạn chế chậm tiến độ, đội chi phí, suy giảm chất lượng và tổn thất tài sản. Thứ hai, về độ tin cậy của báo cáo, KSNB phải bảo đảm thông tin từ công trường đến trụ sở được ghi nhận đầy đủ, kịp thời và chính xác, đặc biệt đối với khối lượng thực hiện, chi phí, vật tư, công nợ và thanh quyết toán. Thứ ba, về mức độ tuân thủ, KSNB phải giúp DNXD chấp hành đúng pháp luật, điều khoản hợp đồng và quy chế nội bộ trong toàn bộ quá trình thi công và quản lý dự án.

Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm trước đây [1, 5, 6, 7, 9, 11, 12] cho thấy ở nhiều DNXD, cơ cấu tổ chức và cơ chế kiểm soát vẫn chưa đáp ứng được các yêu cầu này. Ranh giới giữa chức năng tác nghiệp, chức năng hỗ trợ - giám sát và chức năng đánh giá độc lập thiếu rõ ràng; việc nhận diện rủi ro còn bị động; các thủ tục kiểm soát dễ rơi vào tình trạng hình thức hoặc chồng chéo, hoặc bỏ sót. Vì vậy, tăng cường hiệu lực KSNB trong DNXD không thể chỉ dừng ở việc bổ sung thêm quy trình hay biểu mẫu mà cần thay đổi cách tổ chức trách nhiệm kiểm soát theo hướng rõ vai trò, rõ tuyến phòng vệ, chủ động nhận diện rủi ro và tăng cường tính độc lập trong giám sát, đánh giá. Từ những đòi hỏi nêu trên, việc nghiên cứu và ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong DNXD trở nên cần thiết như một giải pháp tổ chức kiểm soát theo hướng rõ trách nhiệm, chủ động phòng ngừa rủi ro và nâng cao hiệu lực KSNB.

4. ỨNG DỤNG MÔ HÌNH BA LỚP PHÒNG VỆ NHẰM TĂNG CƯỜNG HIỆU LỰC KSNB TRONG DNXD

4.1. Nguyên tắc ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong DNXD

Việc ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong DNXD cần tuân

thủ các nguyên tắc cơ bản để bảo đảm mô hình được vận hành đúng bản chất và phát huy hiệu quả trong thực tiễn [10]. Thứ nhất, mô hình phải phù hợp với đặc thù hoạt động DNXD, gắn với các quy trình thực tế như lập kế hoạch, tổ chức thi công, quản lý vật tư, thiết bị, chất lượng, thanh toán và quyết toán, không sao chép máy móc. Thứ hai, cần phân định rõ chức năng và trách nhiệm của từng lớp. Thứ ba, phải bảo đảm sự phối hợp chặt chẽ giữa các lớp phòng vệ thông qua cơ chế trao đổi thông tin, hỗ trợ và phản hồi lẫn nhau. Thứ tư, mô hình cần gắn với quản trị rủi ro, theo đó mỗi lớp đều tham gia nhận diện, kiểm soát và đánh giá rủi ro ở cấp độ phù hợp. Thứ năm, phải bảo đảm tính độc lập trong đánh giá, đặc biệt đối với lớp thứ ba. Thứ sáu, việc triển khai cần linh hoạt và khả thi, phù hợp với nguồn lực và điều kiện cụ thể của từng DNXD.

4.2. Ứng dụng lớp phòng vệ thứ nhất trong DNXD

Ứng dụng lớp phòng vệ thứ nhất trong DNXD thực chất là đưa KSNB vào ngay quá trình tác nghiệp hàng ngày, biến các bộ phận trực tiếp thực hiện công việc thành chủ thể đầu tiên kiểm soát rủi ro. Lớp thứ nhất thường bao gồm các đội thi công, ban điều hành công trường và các phòng, ban trực tiếp phục vụ thi công như phòng kỹ thuật thi công, phòng vật tư, phòng máy thiết bị, phòng kế hoạch kinh doanh, phòng kế toán tài chính và các bộ phận nghiệp vụ liên quan.

Về bản chất, lớp thứ nhất thực hiện đồng thời ba nhóm trách nhiệm. Thứ nhất, tuân thủ quy trình và các chốt kiểm soát đã ban hành, bao gồm thực hiện đúng thẩm quyền phê duyệt, đúng trình tự nghiệp vụ, đúng định mức, biểu mẫu và chế độ báo cáo. Ví dụ, ban điều hành công trường và đội thi công phải tổ chức thi công đúng biện pháp kỹ thuật, bảo đảm an toàn lao động, sử dụng vật tư và thiết bị đúng mục đích, ghi nhận khối lượng trung thực và báo cáo kịp thời sai lệch phát sinh. Phòng vật tư phải theo dõi nhu cầu, cấp phát, sử dụng và tồn kho vật tư theo từng công trình, hạng mục.

Thứ hai, tự kiểm tra và tự giám sát trong quá trình tác nghiệp. Mỗi bộ phận phát hiện sớm sai sót, bất hợp lý và dấu hiệu bất thường trước khi trở thành rủi ro lớn. Chẳng hạn, phòng kỹ thuật thi công không chỉ lập tiến độ và kiểm tra hồ sơ kỹ thuật mà còn phải giám sát chất lượng, nhận diện nguy cơ ảnh hưởng đến kỹ thuật và tiến độ; phòng máy thiết bị phải kiểm soát vận hành, bảo dưỡng, sửa chữa và điều động thiết bị an toàn, hiệu quả.

Thứ ba, chủ động nhận diện và báo cáo rủi ro. Đây là điểm thể hiện rõ vai trò của lớp phòng vệ thứ nhất trong mô hình ba lớp phòng vệ. Hiệu quả của lớp này phụ thuộc nhiều vào năng lực và trách nhiệm của người đứng đầu các đơn vị tác nghiệp. Khi lớp thứ nhất vận hành tốt, hệ thống KSNB của DNXD sẽ có nền tảng thực chất, tăng khả năng phòng ngừa rủi ro ngay từ nguồn và giảm phụ thuộc vào kiểm tra sau sự việc.

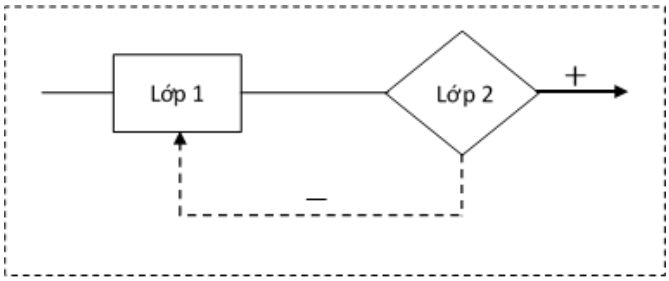
4.3. Ứng dụng lớp phòng vệ thứ hai trong DNXD

Trong DNXD, lớp phòng vệ thứ hai có vai trò tạo lập và duy trì khung quản trị nhằm hỗ trợ lớp phòng vệ thứ nhất vận hành đúng định hướng và trong giới hạn kiểm soát đã xác định. Lớp thứ hai thường bao gồm các bộ phận quản lý rủi ro, quản lý chất lượng, KSNB, pháp chế, công nghệ thông tin và hành chính nhân sự. Tùy theo quy mô DNXD, các chức năng này có thể được tổ chức thành các đơn vị độc lập hoặc bố trí theo hình thức kiêm nhiệm có kiểm soát.

Trước hết, lớp thứ hai thực hiện chức năng hỗ trợ thông qua việc xây dựng chính sách, quy chế, quy trình và công cụ kiểm soát. Bộ phận quản lý rủi ro xây dựng khung quản trị rủi ro phù hợp với đặc thù DNXD; bộ phận quản lý chất lượng ban hành tiêu chuẩn, hướng dẫn và quy trình kiểm soát kỹ thuật; bộ phận pháp chế rà soát hợp đồng và hồ sơ pháp lý; bộ phận công nghệ thông tin hỗ trợ hạ tầng dữ liệu, bảo mật và xử lý thông tin; bộ phận hành chính nhân sự bảo đảm điều kiện tổ chức và nhân lực cho hệ thống vận hành ổn định.

Bên cạnh đó, lớp thứ hai giữ chức năng giám sát tuân thủ và kiểm soát quy trình. Bộ phận KSNB có thể kiểm tra việc chấp hành quy trình thanh toán, cấp phát vật tư, nghiệm thu khối lượng, quản lý tài sản, công nợ và phê duyệt chi phí. Bộ phận quản lý chất lượng giám sát việc tuân thủ tiêu chuẩn kỹ thuật và hồ sơ nghiệm thu, trong khi bộ phận pháp chế rà soát tính hợp lệ, hợp pháp của văn bản và hợp đồng trước khi triển khai. Các hoạt động này giúp hạn chế tình trạng bộ phận tác nghiệp vận hành theo kinh nghiệm chủ quan hoặc bỏ qua các yêu cầu kiểm soát do áp lực tiến độ.

Ngoài ra, lớp phòng vệ thứ hai còn tham gia như một chốt kiểm soát tại các khâu trọng yếu như phê duyệt nhà cung cấp, rà soát điều khoản hợp đồng, xác nhận khối lượng thanh toán hoặc thẩm định hồ sơ dự toán. Với DNXD, lớp thứ hai còn đóng vai trò cầu nối giữa công trường và trụ sở chính, giúp chuyển tín hiệu rủi ro từ hiện trường thành thông tin quản trị hữu ích. Vì vậy, lớp phòng vệ thứ hai là cấu phần trung gian có ý nghĩa chiến lược trong việc nâng cao hiệu lực KSNB.



Hình 2. Lớp 2 với vai trò như một chốt kiểm soát trong quy trình công việc

4.4. Ứng dụng lớp phòng vệ thứ ba trong DNXD

Ứng dụng lớp phòng vệ thứ ba bản chất là thiết lập là bộ phận đánh giá độc lập lớp thứ nhất, lớp thứ hai và hỗ trợ cho nhà quản trị. Đối với DNXD, lớp phòng vệ thứ ba thường được tổ chức dưới hình thức kiểm toán nội bộ, trực thuộc Hội đồng quản trị, Hội đồng thành viên hoặc cấp có chức năng giám sát cao nhất. Lớp thứ ba xem xét tổng thể, độc lập để đánh giá các quy trình, thủ tục kiểm soát có được thiết kế phù hợp và vận hành hiệu quả hay không. Lớp thứ ba không nên trực thuộc trực tiếp bộ máy điều hành về mặt chuyên môn; cơ chế báo cáo của lớp này cần hướng lên cấp quản trị cao nhất, đồng thời vẫn duy trì kênh phối hợp với ban điều hành để bảo đảm kiến nghị được thực thi. Đây là điểm then chốt giúp lớp phòng vệ thứ ba không chỉ phát hiện vấn đề mà còn tạo ra áp lực cải tiến có tính hệ thống.

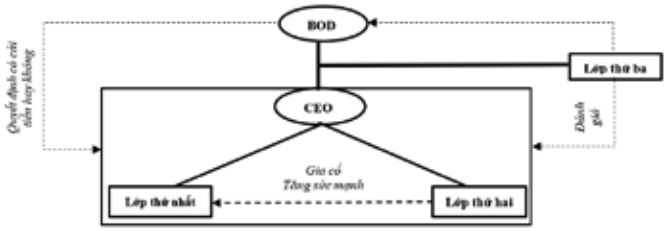
Trong DNXD, lớp thứ ba tập trung vào các khu vực rủi ro cao như quản lý vật tư và thiết bị tại công trường, quản lý chi phí và thanh toán, nghiệm thu khối lượng, kiểm soát hợp đồng, tuân thủ pháp luật thuế và kế toán, quản lý an toàn lao động hoặc chất lượng hồ sơ kỹ thuật. Lớp phòng vệ thứ ba đưa ra kiến nghị cải tiến và cảnh báo liên quan đến việc thiết kế quy trình kiểm soát chi phí, chuẩn hóa chế độ báo cáo giữa công trường và trụ sở chính, hoàn thiện cơ chế phê duyệt hợp đồng, tăng cường giám sát vật tư hoặc ứng dụng công nghệ thông tin vào quản lý dự án và KSNB. Bên cạnh đó, lớp phòng vệ thứ ba thường xuyên rà soát tính phù hợp và hiệu quả của hệ thống KSNB, giúp nâng cao tính minh bạch và độ tin cậy của thông tin phục vụ quản trị.

Trên thực tế, không phải DNXD nào cũng có thể ngay lập tức

tổ chức đầy đủ lớp thứ ba một cách chuyên nghiệp. Trong điều kiện đó, DNXD vẫn cần xác lập tư duy và cơ chế đánh giá độc lập như một cấu phần bắt buộc của quản trị hiện đại. Về dài hạn, lớp phòng vệ thứ ba chính là yếu tố giúp DNXD thoát khỏi tình trạng tự đánh giá hình thức, đồng thời tạo nền tảng cho việc nâng cao chất lượng quản trị nội bộ theo chuẩn mực chuyên nghiệp hơn.

4.5. Cơ chế phối hợp giữa ba lớp phòng vệ trong DNXD

Hiệu quả của mô hình ba lớp phòng vệ phụ thuộc vào việc: (1) Xác định đúng vai trò của từng lớp, (2) thiết lập cơ chế phối hợp giữa các lớp. Khi có cơ chế phối hợp hợp lý, ba lớp phòng vệ sẽ tạo thành một hệ thống kiểm soát liên hoàn, mỗi lớp thực hiện đúng chức năng của mình và hỗ trợ lẫn nhau để tăng cường hiệu lực KSNB.



Hình 3. Cơ chế phối hợp giữa ba lớp phòng vệ

Lớp thứ nhất là nơi phát sinh thông tin gốc về hoạt động và rủi ro. Dữ liệu về tiến độ, vật tư, thiết bị, chi phí, chất lượng, an toàn thi công đều bắt đầu từ công trường và các bộ phận tác nghiệp. Lớp thứ nhất ghi nhận trung thực, báo cáo kịp thời và phản hồi đầy đủ các vấn đề phát sinh. Trên cơ sở đó, lớp thứ hai tiếp nhận, phân tích và phản hồi thông tin kiểm soát. Bộ phận quản lý rủi ro, quản lý chất lượng, KSNB, pháp chế và công nghệ thông tin phải có cơ chế làm việc trực tiếp với tuyến đầu, vừa hỗ trợ giải quyết vấn đề, vừa phát hiện các xu hướng rủi ro hoặc khiếm khuyết mang tính lặp lại trong quy trình. Lớp thứ hai hệ thống hóa thông tin tiếp nhận từ lớp thứ nhất thành dữ liệu quản trị để cung cấp thông tin đầu vào cho lớp thứ ba. Lớp ba tiếp cận, phân tích thông tin, hồ sơ và các báo cáo từ cả lớp thứ nhất và lớp thứ hai. Các kết luận và kiến nghị của lớp thứ ba được phản hồi lại cho ban điều hành và các bộ phận liên quan theo cơ chế rõ ràng, có theo dõi việc thực hiện và đánh giá mức độ khắc phục.

Trong DNXD, cơ chế phối hợp cần được thể chế hóa bằng quy chế phân công, quy trình báo cáo và đầu mối thông tin rõ ràng. Mỗi lớp cần biết khi nào phải báo cáo, báo cáo cho ai, trong trường hợp nào phải phối hợp chéo và khi nào cần báo cáo lên cấp quản trị cao hơn. Đặc biệt, trong các tình huống có rủi ro lớn như chậm tiến độ nghiêm trọng, phát hiện sai lệch chất lượng, tranh chấp hợp đồng, mất an toàn lao động hoặc mất cân đối tài chính, ba lớp phòng vệ phải có cơ chế phối hợp khẩn cấp, tránh chậm trễ trong xử lý. Cơ chế phối hợp này nếu được vận hành tốt sẽ giúp DNXD kiểm soát được rủi ro, điều chỉnh và hoàn thiện hệ thống KSNB trong dài hạn

4.6. Điều kiện bảo đảm và kết quả kỳ vọng khi ứng dụng mô hình

Việc ứng dụng mô hình ba lớp phòng vệ trong DNXD chỉ phát huy hiệu quả khi có những điều kiện đảm bảo nhất định. Cụ thể: (1) Hội đồng quản trị, Hội đồng thành viên và Ban giám đốc, cam kết coi trọng phát triển KSNB; (2) Hệ thống quy định, quy chế bảo đảm phân định rõ trách nhiệm giữa bộ phận tác nghiệp, bộ phận hỗ trợ giám sát và bộ phận đánh giá độc lập; (3) Đảm bảo các nguồn lực chất lượng như nhân lực, công nghệ thông tin và lộ trình triển khai phù hợp. Ứng dụng công nghệ thông tin là điều kiện quan trọng để tăng hiệu quả phối hợp giữa ba lớp phòng vệ. Hệ thống dữ liệu dùng chung, phần mềm quản lý dự án, báo cáo điện tử, cảnh báo tự động và lưu trữ tập trung sẽ giúp giảm độ trễ thông tin, tăng khả năng kiểm tra chéo và hỗ trợ minh bạch hóa quy trình.

Khi được triển khai đúng hướng, mô hình phòng vệ ba lớp được kỳ vọng sẽ nâng cao khả năng nhận diện và cảnh báo rủi ro, cải thiện chất lượng quy trình nghiệp vụ và tăng tính minh bạch của thông tin quản trị. Đồng thời, mô hình còn góp phần giảm sai phạm, thất thoát, nâng cao hiệu quả phối hợp giữa công trường thi công và trụ sở chính, tăng trách nhiệm của người lao động, góp phần tăng cường hiệu lực KSNB. Về dài hạn, đây là nền tảng quan trọng để DNXD nâng cao uy tín, năng lực cạnh tranh và phát triển bền vững.

5. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phân tích lý luận và gắn với đặc thù của DNXD, bài báo đã làm rõ mô hình ba lớp phòng vệ là một khung tổ chức phù hợp góp phần tăng cường hiệu lực KSNB. Tuy nhiên, hiệu quả của mô hình không chỉ phụ thuộc đơn thuần ở việc thay đổi sơ đồ tổ chức, mà gắn chặt với các điều kiện bảo đảm thực hiện khác và lộ trình triển khai. Để tiếp tục phát triển kết quả nghiên cứu này, có thể mở rộng theo hướng khảo sát thực tiễn DNXD nhằm lượng hóa tác động của từng lớp phòng vệ đối với hiệu lực KSNB.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đặng Thị Thúy Anh. Nghiên cứu kiểm soát nội bộ trong các doanh nghiệp xây dựng niêm yết trên thị trường chứng khoán Việt Nam. Luận án Tiến sĩ, Đại học Kinh tế Quốc dân, 2017.

[2] Cục Thống kê. Thông cáo báo chí tình hình kinh tế - xã hội quý V và năm 2025. Internet: https://www.nso.gov.vn/tin-tuc-thong-ke/2026/01/thong-cao-bao-chi-tinh-hinh-kinh-te-xa-hoi-quy-iv-va-nam-2025/ (truy cập tháng 3/2026).

[3] Lê Anh Dũng và Bùi Mạnh Hùng. Quản lý rủi ro trong doanh nghiệp xây dựng. NXB. Xây dựng, 2015.

[4] Đinh Tuấn Hải. Quản lý rủi ro trong xây dựng. NXB. Xây dựng, 2016.

[5] Đỗ Thị Huyền. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thành phần kiểm soát nội bộ đến hiệu lực kiểm soát nội bộ của doanh nghiệp xây dựng công trình giao thông Việt Nam. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2020.

[6] Đỗ Thị Huyền. Tăng cường hoạt động kiểm soát nội bộ của doanh nghiệp xây dựng công trình giao thông. Tạp chí Giao thông vận tải, tr. 183-186, 2020.

[7] Hoàng Thị Hồng Lê, Đỗ Thị Huyền và Phan Thùy Dương. Tác động của cấu trúc kiểm soát nội bộ đến hiệu quả tài chính tại các doanh nghiệp ngành xây dựng niêm yết trên thị trường chứng khoán Việt Nam. Tạp chí điện tử Khoa học và Công nghệ giao thông, 2, tr. 30-41, 2022.

[8] Coso. The 2013 COSO Framework & SOX Compliance. Internet: https://www.coso.org/guidance-on-ic (accessed: 3/2026).

[9] Marika Arena and Giovanni Azzone. Identifying organizational drivers of internal audit effectiveness. International Journal of Auditing. 13(1), pp. 43-60, 2009, doi.org/10.1111/j.1099-1123.2008.00392.x.

[10] The Institute of Internal Auditors IIA IIA Position Paper: The Three Lines of Defense in Effective Risk Management and Control.

[11] Vũ Trọng Tích và các cộng sự. Influence of components of internal control on the effectiveness of internal control: Evidence from transport construction enterprises in Vietnam. The Journal of Asian Finance, Economics. 7(11), pp. 1087-1095, 2020.

[12] Trần Trung Tuấn. The effect of internal control on the performance of Vietnamese construction enterprises. Accounting, 6(5), pp. 781-786, 2020.

[13] World bank. Vietnam Transport Knowledge Series, 2019. Internet: https://documents1.worldbank.org/curated/en/165301554201962827/pdf/Strengthening-Vietnam-s-Trucking-Sector-Towards-Lower-Logistics-Costs-and-Greenhouse-Gas-Emissions.pdf (accessed: 3/2026).

■Ngày nhận bài: 26/3/2026 ■Ngày sửa bài: 07/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 13/4/2026

Áp dụng phương pháp trả lương 3P trong các doanh nghiệp xây dựng dân dụng vừa và nhỏ

Application of the method of 3P salary paying in small and medium construction enterprises

> TS NGUYỄN ĐĂNG HANH[1,*], KS LƯU HOÀNG NGA[2]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Công ty Cổ phần Tư vấn kiến trúc, Kỹ thuật và Xây dựng ARTÉCO
[*]Email: hanhnd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Phương pháp trả lương theo mô hình 3P (Position - Person - Performance) được nhiều doanh nghiệp hiện đại áp dụng nhằm xây dựng hệ thống đãi ngộ công bằng, minh bạch và gắn kết người lao động. Tuy nhiên, trong bối cảnh các doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ tại Việt Nam - nơi đặc trưng bởi quy mô hạn chế, nguồn lực tài chính và nhân sự còn yếu thì việc triển khai mô hình này gặp nhiều thách thức. Bài báo tập trung phân tích khả năng vận dụng phương pháp trả lương 3P trong các doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ tại Việt Nam, chỉ ra những lợi ích, khó khăn và đề xuất giải pháp phù hợp với điều kiện thực tế. Bài báo cũng đề xuất các tiêu chí tính lương cho kỹ sư xây dựng theo mô hình lương 3P.

Từ khóa: Lương 3P; công ty xây dựng; kỹ sư.

ABSTRACT

The 3P (Position - Person - Performance) compensation model is widely adopted by modern businesses to build a fair, transparent, and engaging compensation system for employees. However, in the context of small and medium-sized construction enterprises in Vietnam - characterized by limited scale, financial resources, and human resources - implementing this model faces many challenges. This article focuses on analyzing the applicability of the 3P compensation method in small and medium-sized construction enterprises in Vietnam, highlighting its benefits, difficulties and proposing solutions suitable to the actual conditions. This article also proposes a salary calculation table for construction engineers using the 3P compensation model.

Keywords: 3P salary system; construction company; engineer.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại các doanh nghiệp thiết kế và thi công xây dựng nhà ở riêng lẻ thì công việc theo tính chất dự án, mang tính đa chuyên môn và đặc biệt là phụ thuộc vào yếu tố con người. Tại các doanh nghiệp này trong giai đoạn hiện nay, do đặc thù công việc nên thường xuyên có sự biến động nhân sự ở các bộ phận khác nhau, đội ngũ thợ lao động trực tiếp thì mang tính thời vụ và chưa qua đào tạo bài bản nên kết quả sản xuất kinh doanh sẽ thiếu tính ổn định.

Trong bối cảnh thị trường lao động ngày càng cạnh tranh, việc xây dựng một chính sách lương thưởng hợp lý, minh bạch và gắn với hiệu quả công việc là yếu tố sống còn đối với các doanh nghiệp nói chung và đặc biệt là doanh nghiệp thiết kế và thi công xây dựng nhà ở riêng lẻ để có tuyển dụng và phát huy các nhân sự chất lượng cao, qua đó có thể nâng cao hiệu quả sản xuất kinh doanh [1, 2, 3, 4]. Mô hình trả lương 3P (Position - Person - Performance) [5] được xem là giải pháp hiện đại nhằm tăng hiệu quả quản lý nhân sự, thúc đẩy năng suất lao động và giữ chân nhân tài.

2. TỔNG QUAN TRẢ LƯƠNG TẠI DOANH NGHIỆP XÂY DỰNG VÀ PHƯƠNG PHÁP TRẢ LƯƠNG 3P

2.1. Các thức tính lương của các doanh nghiệp xây dựng dân dụng nhỏ và vừa

Do quy mô các công ty và sự đầu tư hạn chế cho công tác quản trị nên hiện này cách thức đánh giá lương hiện nay của doanh nghiệp xây dựng nhỏ và vừa vẫn chủ yếu dựa theo theo vị trí chức danh và kinh nghiệm (cảm tính theo thâm niên) hoặc trả lương khoán theo khối lượng công việc hoặc giai đoạn thi công.

Việc không có khung năng lực hoặc tiêu chí định lượng, nên việc tăng lương - thưởng thường cảm tính, dễ gây tranh cãi và không tạo ra động lực làm việc cho nhân sự. Thực tế, hiện nay các

doanh nghiệp thường chưa có phần mềm quản lý nhân sự - lương (HRM), hầu hết quản lý lương bằng Excel, sổ sách thủ công, dễ sai sót, thiếu minh bạch và thiếu công cụ để theo dõi năng suất lao động, thời gian làm việc, hiệu quả thực tế.

2.2. Khái niệm về phương pháp trả lương 3P

Hệ thống chi trả lương theo phương pháp 3P là hệ thống được giới thiệu bởi Mercer năm 2005 [5]. Phương pháp 3P nhằm thiết lập hệ thống chi trả dựa trên việc đánh giá vị trí công việc, năng lực cá nhân để thực hiện công việc của nhân viên cũng như hiệu quả làm việc của nhân viên để tạo ra sự công bằng, khuyến khích tạo động lực cho nhân viên nâng cao năng lực, hiệu quả làm việc đóng góp vào sự phát triển của doanh nghiệp. Hệ thống chi trả 3P là trung tâm tạo động lực, giúp doanh nghiệp đảm bảo đạt mục tiêu kinh doanh và duy trì các hoạt động quản trị nhân sự. Phương pháp trả lương 3P này dựa trên 3 yếu tố chính theo Bảng 1.

Bảng 1. Ba yếu tố chính cấu thành lương 3P

3P	Giải thích
P1 - Position (Vị trí công việc)	Trả lương dựa trên giá trị công việc, mức độ phức tạp, trách nhiệm, ảnh hưởng và vai trò trong doanh nghiệp của người đảm nhận vị trí đó. Ví dụ: Kỹ sư giám sát công trình có mức lương cơ bản cao hơn nhân viên bảo trì vì yêu cầu cao hơn về chuyên môn và trách nhiệm.
P2 - Person (Năng lực cá nhân)	Trả lương theo trình độ chuyên môn, kinh nghiệm thực tiễn, kỹ năng nghề nghiệp, phẩm chất thái độ cá nhân của người đảm nhận vị trí đó.
P3 - Performance (Hiệu quả công việc)	Trả lương theo kết quả thực hiện công việc. Có thể dự vào kết quả định lượng (tiến độ, chất lượng, doanh số…) hoặc kết quả định tính (sáng tạo, phối hợp, tuân thủ quy trình…).

2.3. Lợi ích khi áp dụng mô hình 3P trong doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ

Mô hình lương 3P sẽ tạo ra những lợi ích khác nhau trong doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ tại Việt Nam:

Tăng tính công bằng và minh bạch trong trả lương: Mô hình 3P giúp xác định lương dựa trên giá trị công việc (P1), năng lực cá nhân (P2) và hiệu quả công việc (P3), hạn chế tình trạng "cào bằng" hoặc trả lương cảm tính. Nhân viên hiểu rõ lý do vì sao mình được nhận mức lương hiện tại, từ đó tạo ra sự tin tưởng vào hệ thống quản trị nhân sự.

Tạo động lực làm việc và nâng cao hiệu suất: Việc trả lương gắn với hiệu suất làm việc (P3) thúc đẩy người lao động chủ động cải thiện năng suất, chất lượng công việc. Lương 3P khuyến khích nhân viên nâng cao kỹ năng chuyên môn, thái độ làm việc để được ghi nhận về mặt thu nhập.

Gắn kết mục tiêu cá nhân với mục tiêu doanh nghiệp: Mô hình 3P giúp đo lường và thưởng cho hiệu quả công việc gắn với KPIs và mục tiêu cụ thể của dự án, tạo ra sự đồng thuận giữa cá nhân và doanh nghiệp. Đặc biệt trong ngành Xây dựng - nơi tiến độ và chất lượng công trình là yếu tố sống còn, mô hình này giúp kiểm soát tốt hơn hiệu quả thực hiện dự án.

Thu hút và giữ chân nhân sự chất lượng: Chính sách lương rõ ràng, công bằng giúp tạo dựng thương hiệu nhà tuyển dụng uy tín trong ngành Xây dựng. Người lao động cảm thấy có lộ trình phát triển thu nhập rõ ràng, từ đó giảm tỷ lệ nghỉ việc, đặc biệt là ở các vị trí kỹ sư, đội trưởng công trình, giám sát...

2.4. Thách thức khi triển khai mô hình 3P

Dưới đây là những thách thức chính khi triển khai mô hình lương 3P tại các doanh nghiệp xây dựng nhà ở riêng lẻ dân dụng - một phân khúc đặc thù trong ngành Xây dựng:

Tính chất công việc phân tán, khó đo lường hiệu quả: Mỗi công trình nhà ở riêng lẻ thường nhỏ, thời gian thi công ngắn, công việc đa dạng, nhân sự biến động liên tục. Việc đánh giá hiệu suất (P3 - Performance) trở nên chủ quan và cảm tính.

Hạn chế về công nghệ và công cụ quản lý: Nhiều doanh nghiệp vẫn quản lý lương thủ công bằng excel hoặc sổ sách, gây khó khăn trong việc thống kê hiệu quả, theo dõi năng suất lao động.

Tâm lý e ngại thay đổi từ chủ doanh nghiệp và người lao động: Nhiều chủ doanh nghiệp xây dựng dân dụng chưa quen với mô hình quản trị hiện đại, thường thích "đơn giản, nhanh, dễ triển khai". Người lao động ngại việc bị theo dõi, đánh giá, kiểm soát theo hiệu suất, đặc biệt nếu họ quen với phương thức trả lương khoán theo ngày/tuần.

Dù mô hình lương 3P có nhiều lợi ích, nhưng trong bối cảnh các doanh nghiệp xây dựng nhà ở dân dụng - quy mô nhỏ, nhân sự chất lượng chưa cao, công trình phân tán thì việc triển khai cần sự linh hoạt, từng bước, đơn giản hóa mô hình và tập trung vào những yếu tố có thể kiểm soát được.

3. TRIỂN KHAI TRẢ LƯƠNG 3P TRONG DOANH NGHIỆP XÂY DỰNG DÂN DỤNG NHỎ VÀ VỪA

Dưới đây là phân tích chi tiết về khái niệm và quy trình đánh giá các yếu tố chính cấu thành lương 3P:

3.1. Đánh giá vị trí công việc (Position) - P1

Position (vị trí công việc) là mức độ quan trọng, trách nhiệm và yêu cầu của một vị trí trong tổ chức. Các doanh nghiệp xây dựng dân dụng nhỏ và vừa thường sử dụng một số tiêu chí sau để phân tích và đánh giá vị trí công việc theo Bảng 2.

Bảng 2. Các tiêu chí chính để đánh giá vị trí công việc trong lương 3P

Tiêu chí	Mô tả
Mức độ trách nhiệm	Trách nhiệm quản lý, ra quyết định, chịu trách nhiệm kết quả
Độ phức tạp công việc	Mức độ khó khăn, tính chất kỹ thuật, yêu cầu chuyên môn
Mức độ ảnh hưởng	Ảnh hưởng của vị trí đến hoạt động chung của công ty
Khả năng yêu cầu	Kỹ năng, kiến thức, trình độ cần thiết để hoàn thành công việc
Điều kiện làm việc	Môi trường, áp lực công việc, rủi ro liên quan
Phạm vi công việc	Số lượng nhân viên quản lý, phạm vi tác động công việc

3.2. Đánh giá năng lực cá nhân (Person) - P2

Person trong 3P đề cập đến việc đánh giá các yếu tố cá nhân như kỹ năng, trình độ, kinh nghiệm, thái độ làm việc và năng lực chuyên môn của mỗi nhân viên. Mục tiêu là xác định mức độ đóng góp của cá nhân dựa trên khả năng thực tế, không chỉ dựa vào vị trí công việc hay thời gian làm việc. Các tiêu chí đánh giá năng lực cá nhân trong doanh nghiệp xây dựng dân dụng nhỏ và vừa theo Bảng 3.

Bảng 3. Các tiêu chí chính để đánh giá năng lực cá nhân trong lương 3P

Tiêu chí	Mô tả
Kỹ năng chuyên môn	Trình độ chuyên môn, kỹ thuật, nghiệp vụ phù hợp với vị trí
Kinh nghiệm làm việc	Số năm làm việc, kinh nghiệm thực tiễn, dự án đã tham gia
Hiệu quả công việc	Khả năng hoàn thành nhiệm vụ, đạt được mục tiêu công việc
Khả năng học hỏi	Tinh thần học hỏi, tiếp thu kiến thức và cải tiến kỹ năng
Thái độ và tinh thần làm việc	Tính kỷ luật, trách nhiệm, hợp tác trong nhóm
Khả năng giải quyết vấn đề	Năng lực xử lý tình huống, đưa ra giải pháp hiệu quả

3.3. Đánh giá hiệu suất công việc (Performance) - P3

Performance là việc đo lường, đánh giá mức độ hoàn thành nhiệm vụ với mục đích để xác định mức độ đóng góp thực tế của nhân viên so với yêu cầu công việc và kỳ vọng của doanh nghiệp. Các tiêu chí đánh giá hiệu suất công việc trong doanh nghiệp xây dựng dân dụng nhỏ và vừa thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Các tiêu chí chính để đánh giá hiệu suất công việc trong lương 3P

Tiêu chí hiệu suất	Mô tả
Tiến độ thi công	Hoàn thành công việc đúng hoặc vượt tiến độ đề ra
Chất lượng công trình	Đảm bảo tiêu chuẩn kỹ thuật, không có lỗi, sai sót lớn
An toàn lao động	Tuân thủ quy định an toàn, không để xảy ra tai nạn
Tối ưu chi phí	Quản lý hiệu quả nguyên vật liệu, giảm lãng phí
Phản hồi khách hàng	Đánh giá từ khách hàng về thái độ và chất lượng phục vụ
Tinh thần làm việc nhóm	Hợp tác và hỗ trợ đồng nghiệp trong công việc

4. VÍ DỤ MÔ HÌNH LƯƠNG 3P TRONG DOANH NGHIỆP XÂY DỰNG DÂN DỤNG NHỎ VÀ VỪA CHO KỸ SƯ

Trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết lương 3P, tác giả đề xuất bảng lương 3P cho các kỹ sư giám sát công trình xây dựng của một công ty xây dựng dân dụng quy mô vừa và nhỏ theo thang trong Bảng 5.

Bảng 5. Các tiêu chí đánh giá tính lương của kỹ sư giám sát theo lương 3P

TT	Tiêu chí/Miêu tả chi tiết	Các cấp độ	Trọng số
I	**Lương P1 - lương theo vị trí chức danh công việc (theo mức độ phức tạp (giá trị) của công việc/công trình mà nhân sự đảm nhận trong tháng)**		
11	**Mức độ phức tạp của công việc đòi hỏi trình độ và kinh nghiệm của kỹ sư** ***Định nghĩa:*** *Đề cập đến lượng kiến thức và hiểu biết về chuyên môn của công việc khi một người lần đầu đảm nhiêm công việc này.*		
	Công việc này đòi hỏi nhân sự có kinh nghiệm dưới 36 tháng trong nghề xây dựng dân dụng	1	40
	Công việc này đòi hỏi nhân viên phải có kinh nghiệm từ 3 năm đến 5 năm trong nghề xây dựng dân dụng	2	40
	Công việc này đòi hỏi nhân viên phải trình độ cao hoặc kinh nghiệm tương đương từ 5 năm trở lên	4	40
22	**Yêu cầu công việc đòi hỏi sự nỗ lực về thể chất và tinh thần** ***Định nghĩa:*** *Đo lường những yêu cầu về thể chất, quan sát và tnh thần của công việc. Những yêu cầu này cần được đánh giá trên các mặt: Tần suất, thời gian và mức độ nặng nhọc.*		
	Kỹ sư làm việc trong điều kiện thoải mái về tinh thần, mức độ tiêu hao năng lượng bình thường	1	25
	Kỹ sư làm việc cần những nỗ lực thể chất rất nhiều mang vác, thức đêm, tăng ca sớm tối	3	25
33	**Yêu cầu của công việc về kỹ năng giao tiếp và các kỹ năng mềm** ***Định nghĩa:*** *Đo lường yêu cầu của công việc đối với mức độ thường xuyên và trình độ giao tiếp với người khác và khả năng thuyết phục người khác để thành công trong các giao dịch.*		
	Tất cả các cuộc tiếp xúc, giao tiếp đều mang bản chất thường ngày, kỹ sư không phải là người phải khởi đầu các cuộc giao tiếp, tiếp xúc	1	15
	Mục đích của các cuộc tiếp xúc, giao tiếp là để đánh giá, bảo vệ, thương lượng hoặc dàn xếp các vấn đề con người, kỹ thuật hoặc các vấn đề quan trọng hoặc gây tranh cãi	3	15
44	**Mức độ nguy cơ và hậu quả của việc mắc sai sót của công việc** ***Định nghĩa:*** *Đo lượng hậu quả của mỗi sai sót đối với hoạt động nội bộ của công ty hoặc đối với khách hàng của công ty.*		

	Công việc có rất ít khả năng mắc sai lầm. Tất cả công việc được kiểm tra ngay lập tức. Chi phí của việc sửa sai không đáng kể về mặt tiền bạc hoặc có thể sửa lại nhanh chóng	1	20
	Công việc thường xuyên có khả năng gây ra sai sót và thường khó phát hiện được trong một thời gian ngắn. Sai sót này có thể làm ảnh hưởng đến hiệu quả kinh doanh và uy tín của công ty	3	20
	Tổng cộng		100
II	**Lương P2 - lương theo năng lực cá nhân nhân viên (thể hiện với các công trình đang giám sát hay công việc được giao trong tháng)**		
55	**Mức độ chuyên cần** ***Định nghĩa:*** *Đảm bảo thời gian làm việc theo đúng nội quy công ty và phòng thi công để không ảnh hưởng đến hiệu quả công việc.*		
	Tỷ lệ chuyên cần dưới 85% (nghỉ nhiều hơn 3 ngày trong tháng)	0	20
	Tỷ lệ chuyên cần trên 85% (nghỉ 3 ngày)	1	20
	Tỷ lệ chuyên cần đạt trên 90% (chỉ nghỉ 2 ngày)	3	20
	Tỷ lệ chuyên cần đạt trên 95% (chỉ nghỉ 1 ngày)	4	20
66	**Tuân thủ quy trình công việc đã ban hành, đặc biệt chú trọng đến việc kiểm soát và báo cáo mỗi công việc theo checklist đã ban hành** ***Định nghĩa:*** *Đánh giá việc thực hiện đúng các quy trình thực hiện công việc*		
	Nắm bắt nhưng không thực đúng quy trình đã đặt ra. Ví dụ: Không báo cáo công việc theo ngày theo form mẫu, không viết nhật ký thi công, không kiểm tra công việc theo checklist…	-2	30
	Thực hiện đúng quy trình về công tác ứng dụng checklist/hướng dẫn và báo cáo lại sau khi kiểm tra hạng mục bằng checklist nghiêm túc; không có bất kỳ sai sót về mặt quy trình nào trong tháng.	2	30
	Thực hiện đúng quy trình và có các phản hồi để cải tiến quy trình cho mọi bộ phận và cho mọi công việc; có đề xuất bổ sung thêm các quy trình công việc khác hoặc có các đề xuất sáng kiến để hiệu quả công việc của cá nhân, bộ phận và công ty có thể được cải thiện.	4	30
77	**Tuân thủ quy định về báo cáo công việc và giao tiếp** ***Định nghĩa:*** *Đánh giá việc thực hiện đúng các quy định về báo cáo công việc, giao tiếp, tương tác nội bộ và tương tác với CĐT và các bên liên quan.*		
	Báo cáo trên nhóm zalo công việc nhưng báo cáo thiếu lượt, báo cáo muộn giờ và báo cáo thiếu hoặc sai thông tin hoặc sai format, sai chính tả hoặc không biết báo cáo kịp thời các công việc cấp bách cần báo cáo ngay	0	10
	Báo cáo trên nhóm zalo công việc đầy đủ, đúng giờ, đủ thông tin, đúng format, đúng chính tả và báo cáo kịp thời các công việc cấp bách	2	10
	Thực hiện đúng theo các quy định về ghi chép biên bản, báo cáo công việc hàng ngày, báo cáo công việc định kỳ Biết đối đáp khéo léo với CĐT, thường trực trả lời CĐT về tin nhắn và điện thoại	4	10
88	**Lập tiến độ và cập nhật tiến độ thi công** ***Định nghĩa:*** *Đo lường năng lực của nhân sự trong việc lập tiến độ thi công chính xác, chủ động cập nhật tiến độ theo nội quy.*		
	Chỉ lập được tiến độ thi công cơ bản theo thời gian dạng bốc thuốc, thiếu sự chắc chắn và cơ sở nhưng vẫn đảm bảo tính logic về trình tự thời gian và chưa chủ động cập nhật tiến độ thi công 14 ngày một lần	1	15
	Có khả năng lập một tiến độ thi công và chủ động cập nhật tiến độ thi công chi tiết 14 ngày một lần với đầy đủ các nhiệm vụ cần thiết, thời gian và tài nguyên, nguồn nhân lực, ngân sách chi phí	3	15
99	**Thái độ trách nhiệm - tâm huyết - quyết liệt** ***Định nghĩa:*** *Đo lường tinh thần thái độ của nhân sự đối với công việc được giao, thông qua cả suy nghĩ, lời nói và hành động dứt khoát, không ngại khó khăn để đạt mục tiêu công việc.*		

	Tinh thần thái độ hời hợt, tròn vai, cần BGĐ và lãnh đạo bộ phận phải thường xuyên trao đổi, nhắc nhở, hỗ trợ, đốc thúc	0	15
	Tích cực thực hiện các công việc được giao với tinh thần trách nhiệm cao và sẵn sàng hỗ trợ người khác trong công việc	2	15
	Chủ động nhận việc, làm việc chất lượng, sáng tạo giải pháp và kiên trì đến cùng; tận tâm, tận lực hoàn thành công việc, mục tiêu được giao đúng thời hạn	4	15
110	**Thâm niên làm việc liên tục trong công ty hoặc trong hệ sinh thái của công ty** ***Định nghĩa:*** *Đo lường sự gắn bó, niềm tin và tình yêu của nhân sự với công ty.*		
	Dưới 18 tháng kể từ ngày ký hợp đồng lao động chính thức	0	10
	Từ 18 tháng đến 30 tháng	2	10
	Từ 30 tháng đến 48 tháng	3	10
	Trên 48 tháng	4	10
	Tổng cộng		100
	Lương P3 - lương theo thành tích, kết quả công việc		
111	**Doanh thu tiền về từ thi công trong tháng** ***Định nghĩa:*** *Tiêu chí này đo lường giá trị nghiệm thu, thanh quyết toán công trình của chủ đầu tư từ các công trình mà kỹ sư đang giám sát chính trực tiếp hoặc các công trình mà kỹ sư phụ trách công tác bảo hành bảo trì*		
	Giá trị doanh thu dưới 500 triệu	0	25
	Giá trị doanh thu từ 500 triệu đến 1 tỉ đồng	1	25
	Giá trị doanh thu từ 1 tỉ đến 1,5 tỉ đồng	3	25
	Giá trị doanh thu trên 1,5 tỉ đồng	5	25
112	**Số lượng công trình đảm nhận giám sát** ***Định nghĩa:*** *Tiêu chí này đề cấp đến số lượng công trình mà kỹ sư đứng giám sát trực tiếp. Công trình ở cách trụ sở công ty trên 40 km thì được coi là tương đương 2 công trình.*		
	Không đứng chính ở công trình nào (do chưa đủ năng lực hoặc sức khỏe…)	0	20
	Đứng chính ở 1 công trình	1	20
	Đứng chính ở 1 công trình và hỗ trợ một công trình khác	2	20
	Đứng chính ở 2 công trình	4	20
113	**Tiến độ thi công** ***Định nghĩa:*** *Tiêu chí này đề cập đến tiến độ thi công các công trình khi so sánh với tiến độ thi công ban đầu hay tiến độ thi công cập nhật theo kỳ đã được phê duyệt.*		
	Công trình được giao giám sát chính có tiến độ thi công chậm hơn so với kế hoạch theo kỳ > 3 ngày	1	15
	Công trình được giao giám sát chính có tiến độ thi công đạt đúng tiến độ đã đặt ra theo kỳ	2	15
	Công trình được giao giám sát chính có tiến độ thi công nhanh so với kế hoạch theo kỳ ≥ 3 ngày	3	15
114	**Tốc độ nghiệm thu để phục vụ tạm ứng theo giai đoạn và quyết toán công trình/tốc độ hoàn thành hồ sơ khối lượng và quyết toán công trình** ***Định nghĩa:*** *Tiêu chí này đo lường mức độ trách nhiệm, ráo riết trong việc ký các biên bản nghiệm thu thành phần và nghiệm thu tổng thể để các bộ phận nội nghiệp cùng kỹ sư có thể đề nghị tạm ứng hoặc quyết toán.*		

	Nghiệm thu phân đoạn về chất lượng và khối lượng với chủ đầu tư nhưng trễ quá 7 ngày kể từ khi hoàn thành hạng mục công việc/hoàn thành hồ sơ khối lượng và thực hiện xong công tác quyết toán với chủ đầu tư nhưng trễ quá 15 ngày kể từ khi hoàn thành công việc	-2	15
	Nghiệm thu phân đoạn về chất lượng và khối lượng với chủ đầu tư nhưng trễ quá 3 ngày kể từ khi hoàn thành hạng mục công việc/hoàn thành hồ sơ khối lượng và thực hiện xong công tác quyết toán với chủ đầu tư nhưng trễ quá 7 ngày kể từ khi hoàn thành công việc	2	15
	Nghiệm thu phân đoạn về chất lượng và khối lượng với chủ đầu tư đúng tiến độ đặt ra/hoàn thành hồ sơ khối lượng và thực hiện xong công tác quyết toán với chủ đầu tư không quá 7 ngày kể từ khi hoàn thành công việc	5	15
115	**Sai sót trong công việc** **Định nghĩa:** *Tiêu chí này thống kê và đo lường các sai sót trong công việc. Sai sót này có thể là thuộc về mọi mặt của công tác thi công.*		
	Có 1 sai sót và gây ra ảnh hưởng xấu về mặt thương hiệu hoặc tổn hại về tài chính cho công ty	-4	15
	Có 1 sai sót nhưng không gây ra ảnh hưởng về thương hiệu và tổn hại tài chính đáng kể cho công ty	2	15
	Không gây ra bất kỳ sai sót nào đáng kể nào	4	15
116	**Mức độ hài lòng của CĐT và đại diện CĐT** ***Định nghĩa:*** *Tiêu chí này đo lường mức độ hài lòng của chủ đầu tư và các bên liên quan đến chủ đầu tư đến việc thực hiện công việc của kỹ sư.*		
	Chủ đầu tư bực tức và phàn nàn, có ý kiến về chất lượng công việc trên nhóm chung hoặc thông qua các tin nhắn với cấp trên ở công ty. Chủ đầu tư yêu cầu phải thay thế nhân sự hoặc yêu cầu nhân sự khác đến để tăng cường	-3	10
	Chủ đầu tư phàn nàn và có ý kiến về chất lượng công việc trên nhóm chung hoặc thông qua các tin nhắn với cấp trên ở công ty	-3	10
	Chủ đầu tư hoàn toàn không có ý kiến gì về kỹ sư	1	10
	Chủ đầu tư dành lời khen ngợi kỹ sư, có một cái nhìn thiện cảm về công ty, hiểu chính xác về công ty nhưng chưa hoặc không tiếp tục ký hợp đồng thi công tiếp theo hoặc chưa có cơ hội để giới thiệu khách hàng trong giai đoạn này	3	10
	Chủ đầu tư dành lời khen ngợi kỹ sư và tập thể công ty, có một cái nhìn thiện cảm về công ty, hiểu chính xác về công ty và tiếp tục ký hợp đồng thi công tiếp theo lên hoặc giới thiệu khách hàng	5	10
	Tổng cộng		**100**

5. KẾT LUẬN

Hệ thống lương 3P là một mô hình quản trị tiền lương hiệu quả, phù hợp với đặc điểm của doanh nghiệp xây dựng. Việc áp dụng mô hình này giúp doanh nghiệp nâng cao tính công bằng trong trả lương, cải thiện hiệu suất làm việc và tăng khả năng thu hút nhân lực chất lượng cao. Tuy nhiên, mặc dù đã được áp dụng ở một số doanh nghiệp ngành nghề khác nhưng tại các doanh nghiệp xây dựng thì phương pháp 3P vẫn còn khá mới lạ, chưa được phổ biến. Từ việc nghiên cứu cơ sở lý luận, từ thực tiễn công tác quản lý doanh nghiệp xây dựng, qua quá trình phân tích, tác giả đã giới thiệu cách xây dựng hệ thống trả lương 3P đối với doanh nghiệp xây dựng dân dụng nhỏ và vừa. Việc áp dụng chính sách lương 3P sẽ góp phần vào sự phát triển bền vững của mỗi doanh nghiệp nói riêng cũng như sự phát triển theo hướng hiện đại của ngành Xây dựng Việt Nam nói chung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] PC Susanto, NN Sawitri, H Ali, ZT Rony. Employee Performance and Talent Management Impact Increasing Construction Company Productivity. International Journal of Psychology and Health Science (IJPHS), vol. 1, no. 4, pp. 144-152, 2023, doi: 10.38035/ijphs.v1i4.

[2] EM Tafese, DG Mengistu. Labor productivity management practice in construction companies. International Journal of Construction Management, pp. 1-16, 2025, doi: 10.1080/15623599.2025.2559089.

[3] SK Abdurezake, DG Mengistu, SA Abdela, BZ Tesfaye. Construction professionals' retention practice in construction companies. International Journal of Construction Management, no. 26, pp. 365-380, 2026, doi: 10.1080/15623599.2025.2523923.

[4] D Yuvaraj, KS Anandh, K. Mitigating Organizational Withdrawal - The Role of Compensation Packages on Employee Retention in the Construction Sector. In: Nehdi, M., Rahman, R.A., Davis, R.P., Antony, J., Kavitha, P.E., Jawahar Saud, S. (eds) Proceedings of SECON'24. SECON 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, no. 607. Springer, Cham. 2024, doi: 10.1007/978-3-031-70431-4_63.

[5] Misa. Hướng dẫn xây dựng hệ thống lương 3P theo phương pháp chuẩn Mercer. Ebook Misa Amis HRM, 51 trang, 2022.

■Ngày nhận bài: 31/3/2026 ■Ngày sửa bài: 09/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 16/4/2026

Ảnh hưởng của các yếu tố đến chuyển đổi số trong doanh nghiệp xây dựng trên địa bàn TP Hồ Chí Minh

Factors influencing digital transformation in construction enterprises in Ho Chi Minh City

> TS LÊ TRỌNG TÙNG*, NGUYỄN VĂN HOÀI, NGUYỄN NGỌC NGHĨA NGHĨA, TRỊNH VŨ CẨM QUỲNH
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: tunglt_ph@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển đổi số đang là xu thế tất yếu của các doanh nghiệp xây dựng (DNXD) trong bối cảnh của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0. Bài báo nhằm nhận diện và đánh giá sự ảnh hưởng của các yếu tố đến chuyển đổi số của các DNXD trên địa bàn TP.HCM. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra: Hiệu quả kỳ vọng (PE), nỗ lực kỳ vọng (EE), ảnh hưởng xã hội (SI) và điều kiện thuận lợi (FC) có mối quan hệ thuận chiều và ảnh hưởng đến ý định ứng dụng chuyển đổi số (AI) của các DNXD tại TP.HCM. Nghiên cứu cung cấp các thông tin quan trọng cả về phương diện khoa học và thực tiễn cho các cơ quan quản lý nhà nước và các DNXD trong việc đề ra các giải pháp nhằm đẩy mạnh việc triển khai ứng dụng chuyển đổi số.

Từ khóa: Chuyển đổi số; mô hình ảnh hưởng; lý thuyết chấp nhận và sử dụng công nghệ; doanh nghiệp xây dựng.

ABSTRACT

Digital transformation has become an inevitable trend for construction enterprises in the context of the Fourth Industrial Revolution. This study aims to identify and evaluate the factors influencing digital transformation among construction firms in Ho Chi Minh City. The findings indicate that: Performance expectancy (PE), effort expectancy (EE), social influence (SI) and facilitating conditions (FC) all exhibit positive relationships and significantly affect the intention to adopt digital transformation in construction enterprises in Ho Chi Minh City. The study provides important insights from both theoretical and practical perspectives for policymakers and construction firms in formulating strategies to promote the implementation of digital transformation.

Keywords: Digital transformation; influence model; unified theory of acceptance and use of technology; construction enterprises.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, chuyển đổi số đã nổi lên như một giải pháp quan trọng thúc đẩy sự đổi mới và khả năng cạnh tranh trong các ngành công nghiệp trên toàn thế giới. Những tiến bộ nhanh chóng của công nghệ số đang định hình lại các mô hình sản xuất kinh doanh truyền thống. Trong lĩnh vực xây dựng, chuyển đổi số ngày càng được công nhận là một lộ trình chiến lược để nâng cao hiệu quả dự án, cải thiện tích hợp thông tin và hỗ trợ phát triển bền vững. Do đó, nhiều quốc gia trên thế giới đã tích cực thúc đẩy việc ứng dụng chuyển đổi số nhằm nâng cao hiệu quả của hoạt động đầu tư xây dựng. Tại Việt Nam, Chính phủ đã ban hành 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. Bộ Xây dựng đã có Quyết định số 1644/QĐ-BXD ngày 30/9/2025 về việc ban hành Chiến lược chuyển đổi số của Bộ Xây dựng giai đoạn 2025 - 2030. Trong bối cảnh đó, các DNXD phải đẩy mạnh việc áp dụng các công cụ và nền tảng quản lý số để nâng cao năng suất và duy trì khả năng cạnh tranh. Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi số trong các DNXD không chỉ đơn thuần là vấn đề công nghệ mà nó còn được định hình bởi sự tương tác phức tạp của các yếu tố tổ chức, công nghệ và môi trường, đặc biệt là các doanh nghiệp tại các thành phố lớn và phát triển mạnh mẽ như TP.HCM. Mặc dù nhiều nghiên cứu trước đây đã xem xét việc số hóa và áp dụng công nghệ trong ngành Xây dựng, tuy nhiên vẫn còn thiếu các nghiên cứu có hệ thống về các yếu tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng và thực hiện các chiến lược chuyển đổi số ở cấp độ doanh nghiệp. Trong giới hạn của nghiên cứu, bài báo tập trung nghiên cứu sự ảnh hưởng của các yếu tố đến đến chuyển đổi số trong các DNXD trên địa bàn TP.HCM.

Dựa trên cơ sở Lý thuyết thống nhất về chấp nhận và sử dụng công nghệ (UTAUT) của Venkatesh và cộng sự (2003), kết hợp với việc tổng hợp các công trình nghiên cứu về chuyển đổi số và thực trạng chuyển đổi số trong các DNXD, bài báo đã chỉ ra các nhóm yếu tố ảnh hưởng và đề xuất mô hình nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố đến chuyển đổi số trong các DNXD tại TP.HCM. Với số liệu khảo sát từ các chuyên gia và sử dụng các kỹ thuật phân tích định lượng theo phương pháp SPSS, bài báo nhằm làm rõ mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến chuyển số trong các DNXD tại TP.HCM.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng mô hình và giả thuyết nghiên cứu

Việc ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD có thể được phản ánh thông qua ý định hoặc quyết định ứng dụng của doanh nghiệp. Tuy nhiên, theo lý thuyết hành vi hợp lý (TRA) và lý thuyết hành vi có kế hoạch (TPB) thì ý định là yếu tố quyết định hành vi con người, do đó ý định là công cụ tốt nhất để phán đoán hành vi. Hành vi con người được quyết định bởi ý định thực hiện hành vi [3, 5]. Trong mô hình Lý thuyết thống nhất về chấp nhận và sử dụng công nghệ (UTAUT), Venkatesh và cộng sự (2003) cũng khẳng định rằng ý định hành vi là yếu tố trực tiếp quyết định đến hành vi sử dụng công nghệ [7]. Vì vậy, với mục tiêu khám phá và đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến việc ứng dụng chuyển đổi số trong các DNXD tại TP.HCM thì việc ứng dụng chuyển đổi số được nhóm tác giả tập trung nghiên cứu thông qua ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD.

Lý thuyết thống nhất về chấp nhận và sử dụng công nghệ đã được áp dụng việc nghiên cứu các vấn đề trong nhiều lĩnh vực và bối cảnh nghiên cứu khác nhau. Trong lĩnh vực xây dựng, các nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô hình UTAUT có khả năng giải thích cao (lên tới 70%) sự ảnh hưởng của các yếu tố đến ý định và hành vi sử dụng công nghệ, nghĩa là UTAUT hiệu quả hơn các mô hình nghiên cứu trước đây [4, 8]. Do đó, nhiều học giả đã sử dụng mô hình UTAUT để nghiên cứu về ý định và hành vi chấp nhận và sử dụng công nghệ [2, 8]. Vì vậy, với mục tiêu nghiên cứu nhằm khám phá các yếu tố ảnh hưởng đến ý định ứng dụng chuyển đổi số trong các DNXD tại TP.HCM, thì việc áp dụng cơ sở Lý thuyết thống nhất về chấp nhận và sử dụng công nghệ để xây dựng mô hình nghiên cứu là hoàn toàn phù hợp.

Trong mô hình nghiên cứu này, biến phụ thuộc chính là ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD (AI). Hiệu quả kỳ vọng, nỗ lực kỳ vọng, ảnh hưởng xã hội và điều kiện thuận lợi là 4 biến độc lập trong mô hình và được hiểu như sau:

- *Hiệu quả kỳ vọng (PE):* Phản ánh mức độ mà DNXD tin rằng việc ứng dụng chuyển đổi số sẽ giúp cải thiện được hiệu quả công việc của họ như mong đợi.

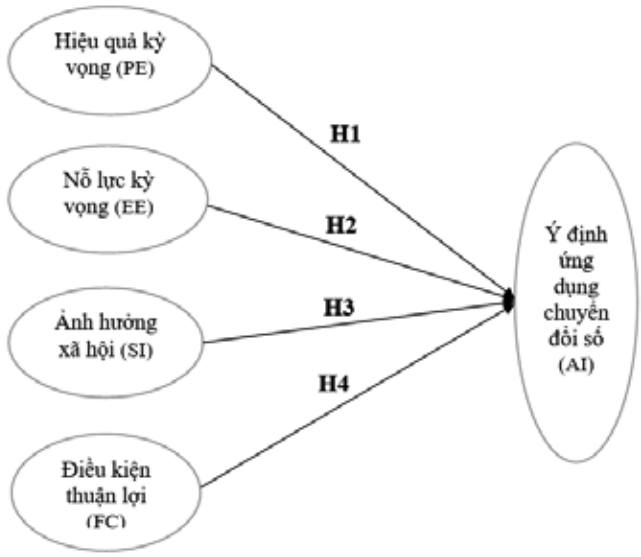
- *Nỗ lực kỳ vọng (EE):* Phản ánh mức độ dễ tìm hiểu và dễ sử dụng của các ứng dụng trong chuyển đổi số mà DNXD cảm nhận được.

- *Ảnh hưởng xã hội (SI):* Phản ánh mức độ tác động đến ý định ứng dụng chuyển đổi số mà DNXD cảm nhận được từ các bên có liên quan trong hoạt động sản xuất kinh doanh.

Theo mô hình UTAUT [7], Venkatesh và cộng sự cho rằng các điều kiện thuận lợi là yếu tố chỉ tác động trực tiếp đến hành vi sử dụng công nghệ. Tuy nhiên, Baozhen và cộng sự [4] khi nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến việc chấp nhận sử dụng thiết bị công nghệ dựa trên UTAUT đã chỉ ra rằng: Các điều kiện thuận lợi ngoài việc tác động trực tiếp đến hành vi sử dụng công nghệ thì còn tác động trực tiếp và đáng kể đến ý định hành vi. Vì vậy, trong mô hình nghiên cứu, nhóm tác giả đề xuất thì yếu tố điều kiện thuận lợi là biến độc lập thứ 4 có tác động trực tiếp đến ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD và được hiểu như sau:

- *Điều kiện thuận lợi (FC):* Phản ánh mức độ DNXD tin rằng họ có đủ các điều kiện về nguồn lực và sự hỗ trợ cần thiết để ứng dụng chuyển đổi số, bao gồm: Nguồn lực tài chính, nhân sự, cơ sở hạ tầng công nghệ, thể chế pháp luật của Nhà nước, các chính sách về chuyển đổi số...

Trên cơ sở xác định các biến độc lập và biến phụ thuộc, mô hình nghiên cứu đề xuất được thể hiện như Hình 1.



Hình 1. Mô hình và các giả thuyết nghiên cứu đề xuất

2.2. Thu thập dữ liệu

Nội dung khảo sát và phương án đánh giá được thiết kế dựa trên thang đo "Likert" 5 mức độ. Với mỗi nội dung, đối tượng khảo sát sẽ dựa vào kinh nghiệm thực tế về ứng dụng chuyển đổi số để đánh giá và lựa chọn phương án trả lời theo 5 mức độ bao gồm: (1) Rất không đồng ý; (2) không đồng ý; (3) trung lập; (4) đồng ý; (5) rất đồng ý.

Đối tượng khảo sát là các chuyên gia đang công tác tại các DNXD tại TP.HCM. Tổng cộng có 110 mẫu khảo sát thu được từ các chuyên gia thông qua phương tiện khảo sát trực tuyến (biểu mẫu google form), trong đó có 100 mẫu khảo sát đủ điều kiện để đưa vào các bước phân tích tiếp theo.

Số lượng mẫu khảo sát tối thiểu được tính toán theo đề xuất của Tabachnick và Fidell [6], theo đó để tiến hành phân tích hồi quy tốt nhất kích thước mẫu $n \geq 50 + 8.m$ (trong đó: m là số biến độc lập trong mô hình). Trong mô hình nghiên cứu đề xuất có 4 biến độc lập, nên kích thước mẫu tối thiểu là 50 + (8 x 4) = 82. Như vậy, với 100 mẫu khảo sát thu thập đáp ứng các thông tin yêu cầu là đủ điều kiện để tiến hành các bước phân tích tiếp theo.

2.3. Phương pháp và công cụ phân tích dữ liệu

Các số liệu khảo sát sau khi thu thập được, nhóm tác giả tiến hành làm sạch dữ liệu, lọc bảng câu hỏi, mã hóa những thông tin cần thiết trong bảng câu hỏi; nhập dữ liệu và phân tích dữ liệu bằng phần mềm SPSS Statistics 26. Dữ liệu sẽ được phân tích thông qua các kỹ thuật phân tích định lượng gồm: Thống kê mô tả; đánh giá độ tin cậy của thang đo; phân tích phương sai; phân tích tương quan và hồi quy tuyến tính.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÌNH LUẬN

3.1. Phân tích thống kê mô tả

Phương pháp thống kê mô tả được nhóm tác giả sử dụng

nhằm sàng lọc các số liệu thô và được thực hiện thông qua các dữ liệu khảo sát thu thập. Kết quả phân tích thống kê mô tả liên quan đến các mẫu khảo sát được sử dụng trong nghiên cứu thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Mô tả mẫu nghiên cứu

Thông tin khảo sát		**Số lượng**	**Tỷ lệ (%)**
Số năm kinh nghiệm của chuyên gia	1 - 5 năm	64	64
	6 - 10 năm	31	31
	11 - 15 năm	03	3
	> 15 năm	02	2
Đơn vị công tác của chuyên gia	Nhà thầu thi công	51	51
	Tư vấn thiết kế	32	32
	Tư vấn QLDA	05	5
	Khác (khảo sát, giám sát…)	12	12

3.2. Phân tích độ tin cậy của thang đo

Độ tin cậy của thang đo được đánh giá thông qua hệ số Cronbach's Alpha. Phạm vi giá trị Cronbach's Alpha là từ 0 đến 1. Giá trị Cronbach's alpha càng cao thì thang đo càng đáng tin cậy và ở mức lớn hơn 0,7 được coi là tốt, mức lớn hơn 0,6 là đủ điều kiện khi kiểm tra độ tin cậy [1].

Mẫu khảo sát các thông tin cho các biến trong mô hình nghiên cứu đề xuất (Hình 1) được thiết kế bao gồm: 4 nội dung khảo sát cho biến "Hiệu quả kỳ vọng - PE", 5 nội dung khảo sát cho biến "Nỗ lực kỳ vọng - EE", 3 nội dung khảo sát cho biến "Ảnh hưởng của xã hội - SI", 5 nội dung khảo sát cho biến "Điều kiện thuận lợi - FC" và 3 nội dung khảo sát cho biến phụ thuộc "Ý định ứng dụng chuyển đổi số của DNXD - AI".

Dữ liệu thu thập từ 100 mẫu quan sát được tổng hợp và kiểm tra độ tin cậy cho 4 biến độc lập và 1 biến phụ thuộc trong mô hình nghiên cứu. Kết quả giá trị của Cronbach's alpha của 4 biến độc lập lần lượt là 0,733; 0,692; 0,635; 0,828 và của 1 biến phụ thuộc là 0,675; hệ số tương quan biến tổng của tất cả 20 biến quan sát đều lớn hơn 0,3, cho thấy thang đo của các biến trong mô hình là đảm bảo độ tin cậy cho các bước phân tích tiếp theo.

3.3. Phân tích phương sai (ANOVA)

Mục đích của phân tích ANOVA trong nghiên cứu này nhằm kiểm tra có sự khác biệt hay không giữa đơn vị công tác của các chuyên gia khi đánh giá về ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD.

Bảng 2. Kiểm tra tính đồng nhất của các phương sai

Test of Homogeneity of Variances					
		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
AI	Based on Mean	3.113	5	94	0.012

Bảng 3. Kiểm định mạnh về sự bằng nhau của trung bình

Robust Tests of Equality of Means				
AI				
	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Welch	1.954	5	9.672	0.174

Từ kết quả kiểm tra tính đồng nhất của các phương sai (Bảng 2) cho thấy mức ý nghĩa Sig. của Levene là 0,012 < 0,05, đồng thời mức ý nghĩa Sig. Welch là 0,174 > 0,05 (Bảng 3), chứng tỏ không có sự khác biệt về giá trị trung bình. Nghĩa là, không có sự khác biệt giữa đơn vị công tác của các chuyên gia khi đánh giá về ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD tại TP.HCM. Sự thống nhất này về mặt kỹ thuật sẽ là hợp lý khi sử dụng tổ hợp mẫu từ các đối tượng khảo sát với đơn vị công tác là khác nhau để tiến hành các bước phân tích tiếp theo.

3.4. Phân tích tương quan

Trước khi phân tích hồi quy, cần phải tiến hành kiểm tra mối liên hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập thông qua hệ số tương quan Pearson (r).

Bảng 4. Phân tích tương quan

Correlations						
		AI	**PE**	**EE**	**SI**	**FC**
AI	Pearson Correlation	1	0.406**	0.239*	0.358**	0.342**
	Sig. (2-tailed)		0.000	0.017	0.000	0.000
	N	100	100	100	100	100
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).						
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).						

Kết quả phân tích tương quan (Bảng 4) cho thấy: Tất cả các mức ý nghĩa Sig. đều < 0,05 và các hệ số tương quan (r) dao động trong khoảng từ 0,239 đến 0,406 (thỏa mãn điều kiện $-1 \le r \le +1$). Như vậy, tất cả 4 biến độc lập trong mô hình đều có mối quan hệ tuyến tính rất chặt chẽ với biến phụ thuộc.

3.5. Phân tích hồi quy tuyến tính và kiểm định mô hình

3.5.1. Phân tích hồi quy tuyến tính

Mục đích của phân tích hồi quy tuyến tính là ước lượng mức độ tương quan giữa biến phụ thuộc và các biến độc lập. Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính được thể hiện từ Bảng 5 đến Bảng 7.

Bảng 5. Kết quả kiểm định R2 và Durbin - Watson

Model Summary[b]					
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0.563[a]	0.317	0.288	0.36904	2.005
a. Predictors: (Constant), FC, EE, PE, SI					
b. Dependent Variable: AI					

Bảng 6. Kết quả kiểm định ANOVA

ANOVA[a]						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6.000	4	1.500	11.014	0.000[b]
	Residual	12.938	95	0.136		
	Total	18.938	99			
a. Dependent Variable: AI						
b. Predictors: (Constant), FC, EE, PE, SI						

Bảng 7. Tổng hợp kết quả phân tích hồi quy

Coefficients[a]								
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients			Collinearity Statistics	
Model		B	Std. Error	Beta	t	Sig.	Tolerance	VIF
1	(Constant)	0.947	0.482		1.964	0.052		
	PE	0.268	0.082	**0.291**	3.282	0.001	0.912	1.096
	EE	0.168	0.076	**0.190**	2.223	0.029	0.990	1.011
	SI	0.214	0.084	**0.228**	2.558	0.012	0.904	1.106
	FC	0.159	0.068	**0.209**	2.355	0.021	0.912	1.096
a. Dependent Variable: AI								

- Từ kết quả phân tích hồi quy tuyến tính ở các bảng trên, ta có:

+ Giá trị hệ số R2 hiệu chỉnh là 0,288 (Bảng 5), như vậy các biến độc lập giải thích được 28,8% sự biến thiên của biến phụ thuộc.

+ Giá trị Sig của F là 0,000 < 0,01 (Bảng 6), đảm bảo mô hình hồi quy tuyến tính có ý nghĩa thống kê với độ tin cậy trên 99% và phù hợp với dữ liệu thực tế.

+ Giá trị hệ số phóng đại phương sai VIF (Bảng 7) của các biến độc lập từ 1,011 đến 1,106 (nhỏ hơn 10) cho thấy không có hiện tượng đa cộng tuyến trong dữ liệu.

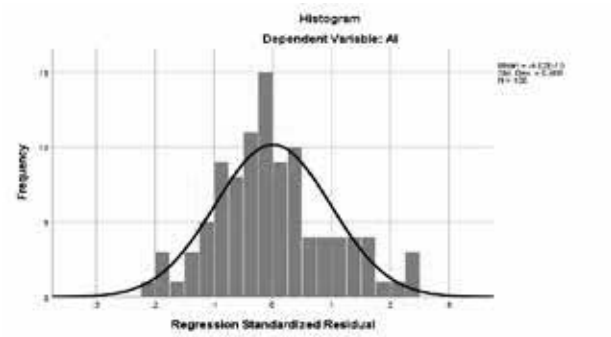
+ Hệ số hồi quy (β) của cả 4 biến độc lập (PE, EE, SI, FC) đều dương (Bảng 7), chứng tỏ cả 4 biến độc lập đều có mối quan hệ thuận chiều với biến phụ thuộc. Giá trị Sig. của kiểm định t của 4 biến độc lập đều < 0,05 (Bảng 7), tức là cả 4 biến độc lập đều đóng vai trò tác động đến biến phụ thuộc (AI). Trong đó, biến "Hiệu quả kỳ vọng - PE" có hệ số hồi quy (β) chuẩn hóa lớn nhất (0,291), chứng tỏ biến PE đóng vai trò ảnh hưởng quan trọng nhất đối với ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD tại TP.HCM.

3.5.2. Kiểm định mô hình hồi quy

** Kiểm định sự phù hợp của mô hình tiên lượng:*

- Kiểm định phân phối chuẩn dao động dư:

Giả định đầu tiên trong phân tích hồi quy đó là phần dư trong hồi quy phải xấp xỉ phân phối chuẩn.

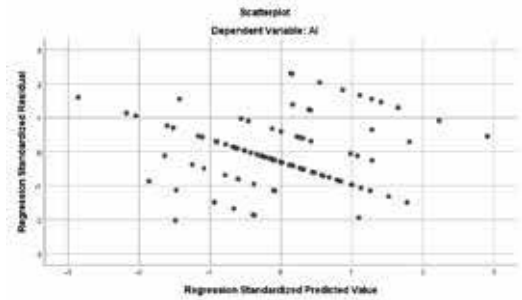


Hình 2. Biểu đồ phân phối dao động dư Histogram

Từ biểu đồ phân phối dao động dư (Hình 2) ta thấy: Đường cong phân phối chuẩn được đặt chồng lên gần trùng với biên độ của biểu đồ tần số. Đường cong này có dạng hình chuông, phù hợp với dạng đồ thị của phân phối chuẩn. Giá trị trung bình (Mean = -4.02E - 15) gần bằng 0, độ lệch chuẩn là 0,980 gần bằng 1. Như vậy, phân phối phần dao động dư của mô hình tiên lượng xấp xỉ chuẩn, giả định phân phối chuẩn của phần dư không bị vi phạm.

** Kiểm định mối quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc và biến độc lập:*

Giả định thứ hai trong phân tích hồi quy đó là phải có mối quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập. Biểu đồ phân tán Scatter Plot giữa các phần dư chuẩn hóa và giá trị dự đoán chuẩn hóa sẽ giúp ta tìm xem dữ liệu hiện tại có vi phạm giả định quan hệ tuyến tính hay không.



Hình 3. Biểu đồ phân tán Scatter Plot

Với biểu đồ Scatter Plot (Hình 3), ta nhận thấy rằng các điểm phân bố của phần dư có dạng đường thẳng và dao động xung quanh đường tung độ 0. Như vậy, giả định quan hệ tuyến tính giữa biến phụ thuộc với các biến độc lập không bị vi phạm.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở vận dụng Lý thuyết thống nhất về chấp nhận và sử dụng công nghệ (UTAUT) của Venkatesh và cộng sự (2003), bài báo đã đề xuất và phân tích mô hình mối quan hệ giữa các yếu tố ảnh hưởng và ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD tại TP.HCM. Kết quả phân tích đã chỉ ra 4 yếu tố: Hiệu quả kỳ vọng, nỗ lực kỳ vọng, ảnh hưởng xã hội và điều kiện thuận lợi có mối quan hệ thuận chiều và tác động đến ý định ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD tại TP.HCM. Trong đó, hiệu quả kỳ vọng đóng vai trò ảnh hưởng quan trọng nhất. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp nhằm đẩy mạnh việc triển khai ứng dụng chuyển đổi số của các DNXD trên địa bàn TP.HCM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hoàng Trọng và Chu Nguyễn Mộng Ngọc. Phân tích dữ liệu nghiên cứu với SPSS. NXB. Thống kê, 2005.

[2] Ademci, E., Gundes, S. Individual and Organisational Level Drivers and Barriers to Building Information Modelling (BIM). Journal of Construction in Developing Countries, 26, pp. 89-109, 2020, doi: 10.21315/jcdc2021.26.1.5.

[3] Ajzen I. The theory of planned behavior. Organization behaviour and human processes, 50, pp. 179-211, 1991.

[4] Dai, B., Larnyo, E., Tetteh, E.A., Aboagye, A.K., Musah, A.A.I. Factors affecting caregivers' acceptance of the use of wearable devices by patients with dementia: An extension of the unified theory of acceptance and use of technology model. American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias®, 35, 2020, doi: 10.1177/1533317519883493.

[5] Fishbein M., Ajzen I. Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research. Reading, MA: Addison Wesley, 1975.

[6] Tabachnick B. G., Fidell L. S. Using Multivariate Statistics, 3rd Edition. New York: Harper Collins, 1996.

[7] Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., Davis, F.D. User acceptance of information technology: Toward a unified view", MIS Quarterly, 27 (3), pp. 425-478, 2003.

[8] Zhang, W., Li, J., Liang, Z. Barriers to Building Information Modeling from an IndividualbPerspective in the ChinesebConstruction Industry: An ExtendedbUnified Theory of Acceptance and Use of Technology. Buildings, 13, 1881, 2023. https://doi.org/10.3390/buildings13071881.

■Ngày nhận bài: 30/3/2026 ■Ngày sửa bài: 08/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2026

Nhận diện các yếu tố rủi ro ảnh hưởng tới thành công dự án hạ tầng giao thông thông minh theo hình thức hợp tác công tư (PPP) trong giai đoạn triển khai

Identification of risk factors influencing the success of smart transportation infrastructure projects under Public-Private Partnership (PPP) during the execution stage

> **THS NGUYỄN HOÀNG LONG[1], PGS.TS NGUYỄN ANH TUẤN[1], PGS.TS NGUYỄN VĂN TIẾP[2,*]**
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM
[2]Trường Đại học Công nghệ kỹ thuật TP.HCM
*Email: tiepnv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc nhận diện và xếp hạng các yếu tố rủi ro trong giai đoạn triển khai dự án hợp tác công tư (PPP) cho hạ tầng giao thông thông minh (ITS) tại TP.HCM dựa trên khảo sát ý kiến chuyên gia. Trong nghiên cứu này, mức độ quan trọng của các rủi ro được định lượng bằng giá trị trung bình và độ lệch chuẩn, và được so sánh theo bốn nhóm chuyên gia (nhà nghiên cứu, cơ quan chức năng, doanh nghiệp nhà nước, tư vấn - chủ đầu tư - nhà tài trợ - nhà thầu). Kết quả cho thấy các rủi ro liên quan đến: chất lượng hợp đồng; quản lý hợp đồng; và ổn định chính sách nằm trong nhóm ưu tiên ở nhiều tiêu chí thành công. Tuy nhiên, thứ hạng và mức độ đồng thuận thay đổi đáng kể dựa trên góc nhìn của các nhóm chuyên gia về rủi ro và mức độ ảnh hưởng. Điều đó cho thấy các nhà quản lý cần tiếp cận quản trị rủi ro dưới nhiều lăng kính khác nhau; và dựa trên mức độ ưu tiên để đưa ra các giải pháp thực tế và khả thi nhằm gia tăng tỷ lệ thành công của các dự án hạ tầng giao thông thông minh.

Từ khóa: Hạ tầng giao thông thông minh; hợp tác công tư; tiêu chí thành công; đánh giá rủi ro.

ABSTRACT

This study focuses on identifying and ranking risk factors during the implementation phase of public-private partnership (PPP) projects for intelligent transport systems (ITS) in Ho Chi Minh City, based on an expert survey. In this research, the importance of risks was quantified using mean values and standard deviations, and comparisons were conducted across four expert groups (researchers, regulatory authorities, state-owned enterprises, and consultants-investors-financiers-contractors). The results indicate that risks related to contract quality, contract management, and policy stability consistently rank among the top priorities across multiple project success criteria. However, the ranking positions and levels of consensus vary considerably depending on the perspectives of different expert groups regarding both the nature of the risks and their impacts. These findings suggest that project managers should adopt a multi-perspective approach to risk governance and prioritize risks accordingly in order to propose practical and feasible solutions, thereby enhancing the success rate of intelligent transport infrastructure PPP projects.

Keywords: Smart transport infrastructure; public-private partnership; success criteria; risk assessment.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và chuyển đổi số đang diễn ra mạnh mẽ, các hệ thống giao thông thông minh (ITS) ngày càng trở thành một phần quan trọng của hạ tầng, góp phần nâng cao an toàn, giảm ùn tắc và tối ưu hóa hoạt động của mạng lưới. Tuy nhiên, đặc điểm của công nghệ cao cùng với việc tích hợp nhiều module và yêu cầu hợp tác nhiều bên đã khiến các dự án hạ tầng giao thông thông minh theo hình thức công tư (PPP-ITS) dễ gặp phải rủi ro trong quá trình triển khai, từ khâu khởi công đến nghiệm thu và vận hành thử. Nếu không sớm nhận diện và kiểm soát các rủi ro này, chúng có thể gây ảnh hưởng tiêu cực đến lợi ích xã hội, hiệu quả ngân sách, nhà đầu tư và mục tiêu phát triển bền vững.

Trong thực tiễn quản lý dự án, bảng xếp hạng rủi ro tổng hợp thường được sử dụng để ưu tiên phân bổ nguồn lực. Tuy nhiên, PPP

là một dạng hợp đồng đa chủ thể; với sự khác biệt về chức năng, quyền hạn và động cơ, các góc nhìn về rủi ro cũng có thể khác nhau. Do đó, nghiên cứu đặt ra câu hỏi nghiên cứu "cùng một danh mục rủi ro triển khai, các nhóm chuyên gia khác nhau có thể đưa ra xếp hạng giống nhau hay có sự phân hóa dựa trên kinh nghiệm và mức độ ưu tiên?". Dựa trên câu hỏi này, nghiên cứu xác định các mục tiêu chính: (i) xác định các yếu tố rủi ro tác động đến các tiêu chí thành công của dự án; (ii) kiểm định độ tin cậy thang đo rủi ro theo Cronbach's Alpha; (iii) xếp hạng các yếu tố rủi ro theo từng tiêu chí thành công; và (iv) so sánh sự khác biệt về xếp hạng và mức độ đồng thuận (độ lệch chuẩn) giữa bốn nhóm chuyên gia.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRƯỚC ĐÂY VỀ CÁC YẾU TỐ RỦI RO TRONG DỰ ÁN PPP

Các nghiên cứu gần đây xem xét việc chọn lựa mô hình PPP như một bài toán đa tiêu chí, chịu tác động cùng lúc từ các yếu tố chính trị, tài chính và rủi ro [1]. Việc lựa chọn không phù hợp có thể làm giảm hiệu quả đầu tư và tính khả thi của dự án. Trong thực tiễn, nhiều dự án thất bại do thiết kế hợp đồng không phù hợp với môi trường thể chế hoặc dự báo thị trường thiếu chính xác [2]. Các ví dụ điển hình cho thấy rủi ro trong việc lựa chọn mô hình không chỉ mang tính kỹ thuật mà còn liên quan tới yếu tố pháp lý và thể chế. Dự án Cầu Hồng Kông - Chu Hải - Macau phải chuyển đổi khỏi mô hình BOT do khung pháp lý đa chính quyền không phù hợp [3]. Dự án Cảng tàu du lịch Kai Tak tại Hong Kong thay đổi cấu trúc hợp đồng khi khu vực tư nhân không còn quan tâm đến BOT [4]. Tại Ba Lan, dự án đường cao tốc A1 bị hủy do thay đổi chính sách thu phí và dự báo lưu lượng không chính xác [5]. Ở Việt Nam, dự án Cầu Phú Mỹ phản ánh ảnh hưởng của dự báo sai lệch và đánh giá khả thi tới kết quả tài chính [6].

Song song với nghiên cứu về lựa chọn mô hình, còn có nhiều hệ thống nghiên cứu mở rộng tập trung vào nhận diện và phân bổ rủi ro trong PPP. Rasheed và cộng sự [7] tổng hợp các phương pháp đánh giá và phân bổ rủi ro, nhấn mạnh vai trò của cơ chế chia sẻ rủi ro công bằng. Zhang và cộng sự [8] cho thấy rủi ro pháp lý, tài chính và thể chế là các nhóm rủi ro phổ biến xuyên quốc gia. Hướng tiếp cận tích hợp được đề xuất bởi Fatima và cộng sự [9], liên kết rủi ro với các chỉ số hiệu suất (KPI), cho rằng quản lý rủi ro cần gắn liền với đánh giá kết quả dự án. Sy và cộng sự [10] xác nhận rằng biến động chính sách và thiếu cam kết từ tư nhân là nguyên nhân dẫn đến xung đột hợp đồng. Để khắc phục, Guo và cộng sự [11] đề xuất minh bạch hóa đấu thầu và ứng dụng công cụ phân tích đa tiêu chí trong quyết định phân bổ rủi ro.

Trong giai đoạn vận hành - bảo trì, Tiep Nguyen và cộng sự [12] chỉ ra rằng rủi ro ngoại sinh (biến động kinh tế, thiên tai) và rủi ro nội sinh (thiết kế không đầy đủ, chậm tiến độ) chiếm tỷ trọng lớn, đồng thời bị ảnh hưởng bởi khung pháp lý và văn hóa đàm phán của từng quốc gia. Kết quả này bổ sung cho các phân tích trước đó của Liu và cộng sự [13], đặc biệt trong bối cảnh hợp đồng O&M. Tại Việt Nam, Likhitruangsilp, Do và Onishi [14] xác định 23 yếu tố rủi ro chính trong PPP giao thông và chỉ ra sự khác biệt đáng kể giữa khu vực công và tư trong nhận thức rủi ro. Khu vực tư đánh giá cao rủi ro liên quan minh bạch và tham nhũng; khu vực công quan tâm nhiều hơn đến năng lực nhà đầu tư và nhu cầu dự án. Điều này phản ánh đặc thù thể chế và môi trường hành chính của Việt Nam. Đối với PPP hạ tầng giao thông thông minh (PPP-ITS), Tiep Nguyen và cộng sự [12] nhấn mạnh các rủi ro đặc thù như thiếu hụt chuyên môn công nghệ, thiếu dữ liệu, can thiệp chính trị và cơ chế phối hợp yếu. Khác với PPP truyền thống, PPP-ITS phụ thuộc mạnh vào tích hợp công nghệ và chia sẻ dữ liệu, làm gia tăng mức độ phức tạp quản trị và bất định hệ thống.

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy hai xu hướng chủ đạo: (i) tối ưu hóa lựa chọn mô hình PPP dựa trên phân bổ trách nhiệm và rủi ro; (ii) nhận diện, phân loại và phân bổ rủi ro theo bối cảnh quốc gia. Tuy nhiên, còn thiếu các nghiên cứu phân tích cấu trúc rủi ro trong giai đoạn triển khai dự án PPP-ITS gắn với các tiêu chí thành công cụ thể, đồng thời so sánh sự khác biệt nhận thức rủi ro giữa các nhóm chủ thể tham gia. Mặc dù các nghiên cứu trước đây đã làm rõ vai trò của lựa chọn mô hình PPP và cơ chế phân bổ rủi ro trong các dự án hạ tầng giao thông, vẫn tồn tại ba khoảng trống đáng kể. Thứ nhất, phần lớn các công trình tập trung vào giai đoạn chuẩn bị và ký kết hợp đồng, trong khi rủi ro phát sinh mạnh nhất lại nằm ở giai đoạn triển khai - nơi sự tương tác giữa kỹ thuật, tài chính và thể chế diễn ra đồng thời. Thứ hai, các nghiên cứu thường xem rủi ro như một tập hợp đồng nhất, chưa phân tích sự khác biệt trong nhận thức và mức độ ưu tiên giữa các nhóm chủ thể tham gia dự án. Thứ ba, đối với PPP hạ tầng giao thông thông minh, rất ít nghiên cứu liên kết rủi ro với các tiêu chí thành công cụ thể (lợi ích xã hội, hiệu quả ngân sách, lợi ích nhà đầu tư và phát triển bền vững). Việc lấp đầy khoảng trống này có ý nghĩa cả về lý thuyết quản trị PPP-ITS và bằng chứng thực nghiệm cho hoạch định chính sách tại Việt Nam.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Quy trình nghiên cứu gồm 3 bước chính. Đầu tiên, xác định các yếu tố rủi ro trong giai đoạn triển khai các dự án đầu tư phát triển hạ tầng giao thông theo mô hình PPP tương tự như PPP-ITS. Thứ hai, tiến hành lập bảng khảo sát và khảo sát thử qua phỏng vấn một số nhà nghiên cứu, chuyên gia. Cuối cùng, thu thập dữ liệu và xử lý bằng phần mềm SPSS, với hai bước phân tích: (i) kiểm định độ tin cậy bằng Cronbach's Alpha cho từng nhóm biến theo tiêu chí; (ii) thực hiện thống kê mô tả (giá trị trung bình, độ lệch chuẩn) và xếp hạng.

Hình 1. Quy trình nghiên cứu

4. KHUNG LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH PHÂN LOẠI RỦI RO

Các nghiên cứu về PPP nhấn mạnh vai trò của rủi ro thể chế, hợp đồng và tài chính trong giai đoạn thực hiện, vì chúng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng thương mại và nghĩa vụ tài khóa. Báo cáo IEG của World Bank [15] từ nhóm IEG cũng cho thấy rằng thiếu năng lực giám sát và sự thay đổi chính sách có thể gây ra "khoảng cách thực thi," từ đó làm giảm hiệu quả của dự án.

Trong nền tảng tổng quan tài liệu và thực tiễn về PPP-ITS, nghiên cứu đã xây dựng danh mục gồm 15 yếu tố rủi ro thuộc 5 nhóm chính: (1) Chính sách (CS), bao gồm các thay đổi chính sách và chất lượng hợp đồng; (2) Năng lực chuyên môn (NLCM), gồm

năng lực về công nghệ/quản lý, giám sát mục tiêu, quản lý hợp đồng, thi công và lắp đặt; (3) Tài chính (TC), liên quan đến bất ổn kinh tế, chi phí mua sắm, và cơ cấu tài chính; (4) Kỹ thuật công nghệ (KTCN), bao gồm quy mô và công nghệ phức tạp, sai sót trong thiết kế, an toàn - bảo mật, cũng như tích hợp mô-đun; (5) Các bên liên quan (CBLQ), đề cập đến cơ chế phối hợp và sự hỗ trợ của cộng đồng. Bốn tiêu chí thành công được sử dụng để liên kết việc đọc kết quả, gồm: lợi ích xã hội (LIXH), hiệu quả ngân sách (HQNS), lợi ích nhà đầu tư (LINDT) và phát triển bền vững (PTBV). Phương pháp này giúp xem xét rủi ro dựa trên kết quả hoặc mục tiêu của dự án thay vì chỉ theo phân loại kỹ thuật.

Bảng 1. Bảng thống kê các tiêu chí thành công của dự án

STT	Tiêu chí thành công của dự án	Mô tả/ ý nghĩa	Nguồn
1	Lợi ích cho xã hội	Nâng cao hiệu quả xã hội, phúc lợi cộng đồng và chất lượng phục vụ cộng đồng	[16], [17]
2	Hiệu quả kinh tế - ngân sách	Giúp giảm gánh nặng tài khóa của chính phủ thông qua việc phân bổ rủi ro và chi phí hợp lý	[18]
3	Lợi ích cho nhà đầu tư	Lợi ích dành cho khu vực tư nhân, đặc biệt là việc đảm bảo tỷ suất lợi nhuận ổn định và cơ hội mở rộng thị trường.	[19], [20]
4	Phát triển bền vững	Kết quả liên quan đến khí hậu, môi trường và quản trị xã hội	[21]

Bảng 2. Bảng thống kê các yếu tố rủi ro

STT	Yếu tố rủi ro	Mô tả/ý nghĩa	Nguồn
1	Rủi ro thay đổi chính sách/quy định	Hệ thống chính trị & chính phủ ổn định, tạo niềm tin cho nhà đầu tư	[12], [22]
2	Rủi ro do thiếu năng lực/kinh nghiệm quản lý ITS	Năng lực/kinh nghiệm quản lý vận hành và bảo trì	[23], [15]
3	Rủi ro do thiếu giám sát liên tục	Giám sát đánh giá liên tục nhằm duy trì hiệu suất, minh bạch, hiệu quả và xử lý kịp thời	[24], [15]
4	Rủi ro do quản lý hợp đồng kém	Hợp đồng thiếu chặt chẽ hoặc mơ hồ thường dẫn đến tranh chấp pháp lý kéo dài, đội chi phí và trì hoãn tiến độ	[22], [15]
5	Rủi ro thiếu năng lực/chuyên môn	Công nghệ chuyên môn cao	[25], [15]
6	Rủi ro chi phí mua sắm cao	Yêu cầu công nghệ cao tăng giá trị hợp đồng, tài chính chưa tối ưu giảm phúc lợi	[26]
7	Rủi ro cơ cấu tài chính không phù hợp	Cơ cấu vốn thiếu bền vững	[26], [15]
8	Rủi ro từ bất định thị trường tài chính	Rủi ro từ biến động tỷ giá, chi phí vốn & giao dịch	[27], [28]
9	Quy mô và tổng mức đầu tư lớn	Phản ánh mức độ lớn - phức tạp của dự án và giá trị tài chính huy động	[29], [30]
10	Rủi ro từ kỹ thuật	Do thiết kế/kỹ thuật	[30]
11	Rủi ro từ do công nghệ phức tạp	Độ phức tạp trong thiết kế và thi công.	[31], [30],
12	Rủi ro từ an toàn, bảo mật	Lỗi phần cứng, phần mềm	[32]
13	Rủi ro từ cộng đồng	Sự ủng hộ từ công chúng & cộng đồng với dự án PPP	[33], [34]
14	Rủi ro từ kết nối/tích hợp các module khác	Công nghệ chưa tích hợp; không rõ quyền sở hữu/khai thác dữ liệu; rủi ro rò rỉ dữ liệu bên thứ ba	[35]
15	Rủi ro trong quá trình thi công, lắp đặt, vận hành	Vượt tiến độ, vượt chi phí, chậm tiến độ	[30]

5. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

5.1. Thống kê mẫu khảo sát

Nghiên cứu này dựa trên 51 phiếu khảo sát hợp lệ (n = 51) từ các chuyên gia giàu kinh nghiệm trong lĩnh vực PPP và hạ tầng giao thông, đặc biệt liên quan đến việc sử dụng công nghệ cao. Trong bối cảnh này, các nghiên cứu về phương pháp luận chỉ ra rằng với cỡ mẫu từ 30-50 quan sát, có thể đảm bảo độ ổn định tương đối của hệ số Alpha và giá trị trung bình, đặc biệt khi mẫu là từ các chuyên gia [36].

Mẫu khảo sát bao gồm bốn nhóm chủ thể chính trong PPP giao thông: cơ quan nhà nước (24%), nhà nghiên cứu (20%), doanh nghiệp nhà nước (20%) và khu vực tư nhân - nhà thầu, tư vấn, nhà đầu tư (31%, cao nhất). Cơ cấu này bảo đảm tính đại diện đa chiều của các bên liên quan. Liên quan tới kinh nghiệm, 56% số người tham gia có trên 10 năm công tác trong lĩnh vực giao thông và quy hoạch; nhóm 5-10 năm chiếm 24%, dưới 5 năm khoảng 20%. Nền tảng chuyên môn và thâm niên cao củng cố độ tin cậy và giá trị thực tiễn của các đánh giá rủi ro

5.2. Kiểm định độ tin cậy thang đo

Các nhóm thang đo theo bốn tiêu chí thành công đều có Cronbach's Alpha đạt ngưỡng chấp nhận (α≥0,648) và nhiều nhóm đạt mức tốt đến rất tốt (α>0,8). Điều này cho thấy các biến quan sát trong từng nhóm rủi ro có tính nhất quán nội tại, đủ điều kiện sử dụng cho xếp hạng và so sánh. Một số nhóm có hệ số α nổi bật: nhóm NLCM dưới tiêu chí PTBV đạt α=0,936; nhóm TC dưới tiêu chí PTBV đạt α=0,932; nhóm CBLQ dưới tiêu chí PTBV đạt α=0,949. Kết quả này hàm ý rằng các rủi ro liên quan năng lực thực thi và phối hợp cộng đồng được các chuyên gia đánh giá tương đối nhất quán khi xét mục tiêu phát triển bền vững

5.3. Xếp hạng rủi ro theo từng tiêu chí thành công

Bảng xếp hạng tổng hợp theo từng tiêu chí cho thấy cấu trúc ưu tiên rủi ro khác nhau giữa các mục tiêu.

Đối với lợi ích xã hội (LIXH), rủi ro chất lượng hợp đồng gây tranh chấp (CS_LIXH2) đứng đầu (TB=7,69), tiếp đến là hạn chế năng lực công nghệ và quản lý (NLCM_LIXH1) và sai sót thiết kế (KTCN_LIXH2). Điều này phản ánh rằng lợi ích xã hội của dự án ITS nhạy cảm với năng lực thiết kế và quản trị và tính rõ ràng của khung hợp đồng.

Bảng 3. Xếp hạng các yếu tố rủi ro theo tiêu chí LIXH

Mã	Yếu tố rủi ro	TB	SD	Hạng
CS_LIXH2	Chất lượng hợp đồng kém dẫn đến tranh chấp pháp lý trong quá trình thực hiện dự án	7,69	1,463	1
NLCM_LIXH1	Hạn chế về chuyên môn công nghệ và quản lý dự án của các nhóm liên quan	7,51	1,223	2
KTCN_LIXH2	Sai sót về kỹ thuật từ thiết kế	7,31	1,581	3
NLCM_LIXH2	Thiếu sự giám sát liên tục về mục tiêu để có sự điều chỉnh kịp thời trong quá trình thực hiện dự án	7,24	1,450	4
NLCM_LIXH4	Rủi ro trong thi công, lắp đặt	7,18	1,352	5

Với hiệu quả ngân sách (HQNS), nhóm quản lý hợp đồng (NLCM_HQNS3) và sai sót thiết kế (KTCN_HQNS2) chiếm hai vị trí đầu. Đây là bằng chứng định lượng cho luận điểm: chi phí ngân sách không chỉ bị chi phối bởi yếu tố tài chính vĩ mô mà còn bị quyết định bởi chất lượng quản trị triển khai và kiểm soát thay đổi kỹ thuật.

Bảng 4. Xếp hạng các yếu tố rủi ro theo tiêu chí HQNS

Mã	Yếu tố rủi ro	TB	SD	Hạng
NLCM_HQNS3	Quản lý kém hợp đồng, hợp đồng không rõ ràng	6,80	1,732	1
KTCN_HQNS2	Sai sót về kỹ thuật từ thiết kế	6,75	1,958	2
CS_HQNS2	Chất lượng hợp đồng kém dẫn đến tranh chấp pháp lý trong quá trình thực hiện dự án	6,65	1,937	3
CBLQ_HQNS2	Thiếu sự ủng hộ từ cộng đồng cho dự án	6,61	1,511	4
NLCM_HQNS2	Thiếu sự giám sát liên tục về mục tiêu để có sự điều chỉnh kịp thời trong quá trình thực hiện dự án	6,61	1,721	5

Ở tiêu chí lợi ích nhà đầu tư (LINDT), các rủi ro thuộc nhóm chính sách-hợp đồng giữ thứ hạng cao nhất (CS_LINDT2 và CS_LINDT1). Điều này nhất quán với kỳ vọng của nhà đầu tư về tính ổn định thể chế và khả năng bảo vệ quyền lợi hợp đồng.

Bảng 5. Xếp hạng các yếu tố rủi ro theo tiêu chí LINDT

Mã	Yếu tố rủi ro	TB	SD	Hạng
CS_LINDT2	Chất lượng hợp đồng kém dẫn đến tranh chấp pháp lý trong quá trình thực hiện dự án	7,25	1,671	1
CS_LINDT1	Thay đổi chính sách hay quy định trong thời gian thực hiện dự án	7,22	1,781	2
NLCM_LINDT3	Quản lý kém hợp đồng, hợp đồng không rõ ràng	6,98	1,449	3
KTCN_LINDT2	Sai sót về kỹ thuật từ thiết kế	6,94	1,630	4
TC_LINDT2	Chi phí mua sắm cao	6,88	1,728	5

Đối với phát triển bền vững (PTBV), rủi ro thi công-lắp đặt (NLCM_PTBV4) và quản lý hợp đồng (NLCM_PTBV3) nổi lên, cho thấy mục tiêu bền vững chịu ảnh hưởng đáng kể từ năng lực thực thi và chất lượng quản trị dự án.

Bảng 6. Xếp hạng các yếu tố rủi ro theo tiêu chí PTBV

Mã	Yếu tố rủi ro	TB	SD	Hạng
NLCM_PTBV4	Rủi ro trong thi công, lắp đặt	6,71	1,770	1
NLCM_PTBV3	Quản lý kém hợp đồng, hợp đồng không rõ ràng	6,65	1,585	2
KTCN_PTBV1	Quy mô lớn và công nghệ phức tạp	6,63	1,720	3
NLCM_PTBV1	Hạn chế về chuyên môn công nghệ và quản lý dự án của các nhóm liên quan	6,63	1,574	4
CS_PTBV1	Thay đổi chính sách hay quy định trong thời gian thực hiện dự án	6,61	1,756	5

5.4. So sánh xếp hạng theo nhóm chuyên gia

Bảng xếp hạng theo nhóm chuyên gia (Bảng 7) cho thấy sự khác biệt có hệ thống giữa "bảng xếp hạng chung" và "bảng xếp hạng theo chủ thể". Nhóm nhà nghiên cứu ưu tiên mạnh các rủi ro vĩ mô gắn với tính ổn định thể chế và điều kiện thị trường - thể hiện qua chính sách (CS_LINDT1) và tài chính (TC_LINDT1) cùng đạt TB=8,60 và SD=0,516. Đồng thời, nhiều rủi ro thuộc tiêu chí LINDT) và HQNS được nhóm này xếp hạng cao, phản ánh xu hướng đánh giá dựa trên khả năng bảo vệ tính khả thi kinh tế-tài chính của dự án.

Bảng 7. Top rủi ro ưu tiên theo nhóm chuyên gia (trị trung bình; độ lệch chuẩn)

Nhóm	Top 1	Top 2	Top 3	Top 4	Top 5
Nhà nghiên cứu	CS_LINDT1 (8,60;0,516)	TC_LINDT1 (8,60;0,516)	NLCM_LINDT3 (8,50;0,527)	TC_LINDT2 (8,50;0,527)	CS_HQNS2 (8,40;0,699)
Cơ quan ban ngành	CS_LIXH1 (8,00;0,953)	CS_LIXH2 (8,00;0,000)	NLCM_LIXH1 (7,92;0,900)	NLCM_LIXH2 (7,75;0,622)	NLCM_LIXH3 (7,75;0,622)
Doanh nghiệp NN	CS_LIXH1 (7,69;0,947)	CS_LIXH2 (7,54;1,127)	NLCM_LIXH1 (7,46;1,391)	NLCM_LIXH2 (7,46;1,713)	NLCM_LIXH3 (7,31;1,032)
TV–CĐT–TTV–NT	CS_LIXH1 (7,31;1,991)	CS_LIXH2 (7,31;1,493)	NLCM_LIXH1 (6,81;1,642)	NLCM_LIXH2 (6,75;1,732)	NLCM_LIXH3 (6,50;1,932)

Ngược lại, ba nhóm còn lại (cơ quan ban ngành, doanh nghiệp nhà nước và tư vấn-nhà thầu) đều ưu tiên các rủi ro thuộc tiêu chí LIXH, trong đó chính sách gồm CS_LIXH1 và CS_LIXH2 đứng đầu. Điều này cho thấy ở cấp thực thi, các bên nhấn mạnh tính hợp pháp, chất lượng hợp đồng và năng lực quản trị được coi là điều kiện tiên quyết để hiện thực hóa lợi ích xã hội của dự án ITS. Điểm đáng chú ý là nhóm tư vấn-nhà thầu có trị trung bình nhìn chung thấp hơn và độ lệch chuẩn cao hơn, hàm ý đánh giá nhạy theo bối cảnh dự án, địa phương và cơ cấu hợp đồng cụ thể.

Kết quả xếp hạng theo tiêu chí giúp nhận diện những "rủi ro lõi" của giai đoạn triển khai PPP-ITS, gồm: (i) rủi ro về chất lượng hợp đồng và tranh chấp pháp lý; (ii) rủi ro liên quan đến quản lý hợp đồng hoặc giám sát mục tiêu; và (iii) rủi ro kỹ thuật do thiết kế gây ra. Những rủi ro này thường xuất hiện trong nhóm ưu tiên cao trên nhiều tiêu chí thành công, cho thấy chúng không chỉ là vấn đề tác nghiệp mà còn là nút thắt trong cấu trúc của việc triển khai. Phát hiện này càng khẳng định rằng hợp đồng và năng lực quản trị là các "hạ tầng mềm" quyết định hiệu quả của PPP [37], [38].

Dựa trên dữ liệu độ lệch chuẩn, có thể xác định mức độ thương lượng cần thiết khi phân bổ rủi ro. Những rủi ro có SD rất thấp (ví dụ, CS_LIXH2 của nhóm cơ quan nhà nước) thích hợp để chuẩn hóa quy trình kiểm soát và điều khoản hợp đồng. Ngược lại, các rủi ro có SD cao (ví dụ, CS_LIXH1 ở nhóm tư vấn-nhà thầu) phản ánh sự phụ thuộc vào bối cảnh đánh giá, có thể gây ra bất đối xứng thông tin; do đó, cần có cơ chế minh bạch dữ liệu, điều chỉnh điều khoản linh hoạt và hệ thống giải quyết tranh chấp rõ ràng.

Về mặt quản trị, kết quả đề xuất một cơ chế ưu tiên rủi ro dựa trên hai trục: trục quan trọng (mean) và trục đồng thuận (SD), đồng thời liên kết với tiêu chí thành công. Cơ chế này hỗ trợ các cơ quan nhà nước và các đối tác PPP trong việc xây dựng 'danh mục hành động' dựa trên mức độ cấp bách và cần đàm phán, qua đó nâng cao tính nhất quán giữa mục tiêu chính sách và quá trình thực thi dự án.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xếp hạng 15 yếu tố rủi ro trong quá trình triển khai dự án PPP-ITS theo bốn tiêu chí thành công: LIXH, HQNS, LINDT, và PTBV. Kết quả cho thấy các yếu tố rủi ro của các dự án PPP-ITS không phân bố đều, mà tập trung vào nhóm "rủi ro lõi" ảnh hưởng đến tất cả các tiêu chí, đặc biệt là: chất lượng hợp đồng dẫn đến tranh chấp pháp lý, quản lý hợp đồng và giám sát không hiệu quả, cùng với sai sót kỹ

thuật trong thiết kế. Đây là các rủi ro mang tính hệ thống, tác động cùng lúc đến hiệu quả tài chính, tính hợp pháp và tính bền vững của dự án. Phân tích theo từng tiêu chí cho thấy sự khác biệt trong cách cấu trúc rủi ro phản ứng. Hiệu quả ngân sách bị ảnh hưởng lớn bởi quản trị hợp đồng và kiểm soát thay đổi kỹ thuật. Lợi ích nhà đầu tư phụ thuộc nhiều vào tính ổn định của chính sách và khung hợp đồng chặt chẽ. Phát triển bền vững liên quan nhiều đến năng lực thi công-lắp đặt và khả năng quản trị dự án dài hạn. Điều này cho thấy rằng thành công của các dự án PPP-ITS không thể đạt được chỉ bằng việc kiểm soát một loại rủi ro duy nhất, mà cần có cách tiếp cận tích hợp giữa các yếu tố pháp lý, kỹ thuật và quản lý trị.

Quan trọng hơn, so sánh giữa bảng xếp hạng tổng hợp và bảng xếp hạng theo từng nhóm chuyên gia cho thấy sự khác biệt đáng kể về ưu tiên rủi ro. Nhóm nhà nghiên cứu có xu hướng nhấn mạnh rủi ro vĩ mô-thể chế (ổn định chính sách, cấu trúc hợp đồng), trong khi các nhóm cơ quan quản lý, doanh nghiệp nhà nước và tư vấn-nhà đầu tư-nhà thầu lại tập trung nhiều hơn vào rủi ro ảnh hưởng trực tiếp đến lợi ích xã hội và tính hợp pháp trong triển khai. Điều này khẳng định rằng bảng xếp hạng tổng hợp tuy phản ánh xu hướng chung nhưng không thể thay thế phân tích theo chủ thể. Do đó, quản trị rủi ro các dự án PPP-ITS cần được thiết kế trên cơ sở tham vấn đa bên, kết hợp hai chiều đánh giá: (i) mức độ quan trọng trung bình của rủi ro và (ii) mức độ đồng thuận hoặc phân hóa giữa các nhóm lợi ích. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao tính minh bạch trong lựa chọn mô hình PPP mà còn góp phần giảm thiểu xung đột, tăng khả năng chấp nhận xã hội và củng cố tính bền vững dài hạn của dự án hạ tầng giao thông thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. Zhao and F. Ying, "Method selection: a conceptual framework for public sector PPP selection," Built Environment Project and Asset Management, vol. 9, no. 2, pp. 214-232, 2019.

[2] M. A. Soomro and X. Zhang, "Analytical review on transportation public private partnerships failures," International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, vol. 2, no. 2, 2011.

[3] E. Cheung and A. P. Chan, "Is BOT the best financing model to procure infrastructure projects? A case study of the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge," Journal of Property Investment & Finance, vol. 27, no. 3, pp. 290-302, 2009.

[4] E. Luk, "New grouping wins rights to Kai Tak cruise terminal," 2012. [Online]. Available: http://www.thestandard.com.hk/sections-news_print.php?id=120511.

[5] V. Cuttaree, M. Humphreys, S. Muzira, and J.-P. Strand, "Private participation in the transport sector: Lessons from recent experience in Europe and central Asia," 2009.

[6] V. Likhitruangsilp, S. T. Do, M. Onishi, and T. T. D. Tran, "Analyzing problems affecting the performances of public-private partnership transportation projects–Case studies in Vietnam," Songklanakarin Journal of Science & Technology, vol. 40, no. 6, pp. 1405-1419, 2018.

[7] N. Rasheed, W. Shahzad, M. Khalfan, and J. O. B. Rotimi, "Risk identification, assessment, and allocation in PPP projects: A systematic review," Buildings, vol. 12, no. 8, p. 1109, 2022.

[8] X. Zhang and M. Ali Soomro, "Failure path analysis with respect to private sector partners in transportation public-private partnerships," Journal of Management in Engineering, vol. 32, no. 1, p. 04015031, 2016.

[9] A. Fatima, S. Mubin, and R. Masood, "Risk-based integrated performance assessment framework for public-private partnership infrastructure projects," Organization, technology & management in construction: an international journal, vol. 16, no. 1, pp. 251-274, 2024.

[10] D. T. Sy, V. Likhitruangsilp, M. Onishi, and P. T. Nguyen, "Impacts of risk factors on the performance of public-private partnership transportation projects in Vietnam," 2016.

[11] K. Guo, L. Zhang, and T. Wang, "Concession period optimisation in complex projects under uncertainty: a public-private partnership perspective," Construction management and economics, vol. 39, no. 2, pp. 156-172, 2021.

[12] T. Nguyen, L. Hallo, and I. Gunawan, "Investigating risk of public–private partnerships (PPPs) for smart transportation infrastructure project development," Built Environment Project and Asset Management, vol. 14, no. 1, pp. 74-91, 2023.

[13] J. Liu, P. E. Love, J. Smith, M. Regan, and P. R. Davis, "Life cycle critical success factors for public-private partnership infrastructure projects," Journal of Management in Engineering, vol. 31, no. 5, p. 04014073, 2015.

[14] V. Likhitruangsilp, S. T. Do, and M. Onishi, "A comparative study on the risk perceptions of the public and private sectors in public-private partnership (PPP) transportation projects in Vietnam," Engineering Journal, vol. 21, no. 7, pp. 213-231, 2017.

[15] I. E. Group., "World Bank Group support to public-private partnerships: Lessons from experience in client countries," World Bank Group, 2015, vol. FY02-14.

[16] N. S. Jayasena, D. W. Chan, M. M. Kumaraswamy, S. Seidu, E. Ekanayake, and F. M. Siu, "Adoption of public-private partnership (PPP) in smart infrastructure development projects in developing nations: An explorative structural equation modelling analysis," Cities, vol. 152, p. 105232, 2024.

[17] O. M. Rouhani, R. R. Geddes, H. O. Gao, and G. Bel, "Social welfare analysis of investment public-private partnership approaches for transportation projects," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 88, pp. 86-103, 2016.

[18] M. Siemiatycki and J. Friedman, "The trade-offs of transferring demand risk on urban transit public-private partnerships," Public Works Management & Policy, vol. 17, no. 3, pp. 283-302, 2012.

[19] L. X. Liu, S. Clegg, and J. Pollack, "The effect of public–private partnerships on innovation in infrastructure delivery," Project Management Journal, vol. 55, no. 1, pp. 31-49, 2024.

[20] H. Wang, Y. Liu, W. Xiong, and D. Zhu, "Government support programs and private investments in PPP markets," International Public Management Journal, vol. 22, no. 3, pp. 499-523, 2019.

[21] C. Boadi, R. Osei-Kyei, and V. W. Tam, "Critical ESG Assessment Criteria for Public-Private Partnership Projects: A Pareto Analysis of Literature," in CIB Conferences, 2025, vol. 1, no. 1, p. 323.

[22] R. Osei-Kyei and A. P. Chan, "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.

[23] D. Grimsey and M. K. Lewis, "Public private partnerships: The worldwide revolution in infrastructure provision and project finance," in Public Private Partnerships: Edward Elgar Publishing, 2004.

[24] G. I. Hub, "Managing PPP contracts after financial close: Practical guidance for governments managing PPP contracts, informed by real-life project data," Turner & Townsend, 2018.

[25] M. Siemiatycki, "Delivering transportation infrastructure through public-private partnerships: Planning concerns," Journal of the American planning association, vol. 76, no. 1, pp. 43-58, 2009.

[26] E. Engel, R. Fischer, and A. Galetovic, "The basic public finance of public–private partnerships," Journal of the European economic association, vol. 11, no. 1, pp. 83-111, 2013.

[27] A. S. Bu-Qammaz, I. Dikmen, and M. T. Birgonul, "Risk assessment of international construction projects using the analytic network process," Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 36, no. 7, pp. 1170-1181, 2009.

[28] I. M. Fund, "Mastering the risky business of public-private partnerships in infrastructure," Washington, DC, 2021.

[29] X. Zhang, "Critical success factors for public–private partnerships in infrastructure development," Journal of construction engineering and management, vol. 131, no. 1, pp. 3-14, 2005.

[30] M. Jefferies, "Critical success factors of public private sector partnerships: A case study of the Sydney SuperDome," Engineering, Construction and Architectural Management, vol. 13, no. 5, pp. 451-462, 2006.

[31] A. G. 2008a, "National Public Private Partnership Guidelines Overview," Infrastructure and Regional Development, no. Australian Government., 2008.

[32] I. European Telecommunications Standards, "ETSI TS 103 191-3 V1.3.1 (2021-11): Intelligent Transport Systems (ITS); Testing; Conformance test specifications for Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services; Part 3: Abstract Test Suite (ATS) and Protocol Implementation eXtra Information for Testing (PIXIT)," in "ETSI TS 103 191-3," ETSI, Sophia Antipolis Cedex, France, V1.3.1 (2021-11) 2021/11 2021. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/10319103/01.03.01_60/ts_10319103v010301p.pdf

[33] B. Li, A. Akintoye, P. J. Edwards, and C. Hardcastle, "Perceptions of positive and negative factors influencing the attractiveness of PPP/PFI procurement for construction projects in the UK: Findings from a questionnaire survey," Engineering, Construction and Architectural Management, 2005.

[34] J. Yuan, C. Wang, M. J. Skibniewski, and Q. Li, "Developing key performance indicators for public-private partnership projects: questionnaire survey and analysis," Journal of Management in Engineering, vol. 28, no. 3, pp. 252-264, 2012.

[35] M. Hoeft, M. Pieper, K. Eriksson, and H.-J. Bargstädt, "Toward life cycle sustainability in infrastructure: the role of automation and robotics in PPP projects," Sustainability, vol. 13, no. 7, p. 3779, 2021.

[36] D. G. Bonett and T. A. Wright, "Cronbach's alpha reliability: Interval estimation, hypothesis testing, and sample size planning," Journal of Organizational Behavior, vol. 36, no. 1, pp. 3-15, 2015, doi: 10.1002/job.1960.

[37] B. Li, A. Akintoye, P. J. Edwards, and C. Hardcastle, "Critical success factors for PPP/PFI projects in the UK construction industry," Construction management and economics, vol. 23, no. 5, pp. 459-471, 2005.

[38] I. E. G. (IEEG), "World Bank Group support to public-private partnerships: Lessons from experience in client countries, FY02-12," in "World Bank Publications," Washington, DC, 2015.

■Ngày nhận bài: 03/4/2026 ■Ngày sửa bài: 15/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/4/2026

Phân tích tác động của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ tại Việt Nam

Analyzing the impact of capital plan control activities on the disbursement progress of public investment in road transport projects in Vietnam

> 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: hainl@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tập trung phân tích ảnh hưởng của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án xây dựng giao thông đường bộ tại Việt Nam. Trên cơ sở kế thừa và điều chỉnh các nghiên cứu trước, 5 chỉ tiêu (CT1-CT5) được sử dụng để đo lường mức độ kiểm soát kế hoạch vốn, làm biến độc lập trong mô hình nghiên cứu. Dữ liệu sơ cấp được thu thập từ 136 mẫu khảo sát hợp lệ đại diện cho các ban quản lý dự án, cơ quan quản lý vốn đầu tư, cơ quan kế hoạch, cơ quan tài chính và Kiểm toán Nhà nước. Kết quả phân tích hồi quy cho thấy mô hình giải thích được 42,4% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân (Adjusted R^2 = 0,424). Trong đó, 4 chỉ tiêu CT1, CT2, CT3, CT4 có tác động trực tiếp và có ý nghĩa thống kê đến tiến độ giải ngân, đặc biệt CT1 và CT2 đóng vai trò then chốt trong việc theo dõi từ khâu lập, thẩm định đến triển khai kế hoạch vốn. Chỉ tiêu CT5 (hành động khắc phục) chưa cho thấy tác động trực tiếp đáng kể nhưng có ảnh hưởng gián tiếp thông qua việc nâng cao hiệu quả hệ thống giám sát. Nghiên cứu khẳng định vai trò quan trọng của việc xây dựng hệ thống kiểm soát kế hoạch vốn toàn diện, liên tục, gắn với cơ chế phản hồi nhanh để nâng cao hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công.

Từ khóa: Kiểm soát kế hoạch vốn; giải ngân vốn đầu tư công; giao thông đường bộ; giám sát - đánh giá; hành động khắc phục.

ABSTRACT

This paper analyzes the impact of capital plan control activities on the disbursement progress of public investment in road transport infrastructure projects in Vietnam. Building on and adapting previous studies, five indicators (CT1-CT5) were employed to measure the level of capital plan control and were used as independent variables in the regression model. Primary data were collected from 136 valid survey responses representing project management units, public investment management authorities, planning agencies, financial agencies and the State Audit Office. The regression results show that the model explains 42.4% of the variation in disbursement progress (Adjusted R^2 = 0.424). Four indicators CT1, CT2, CT3, and CT4 exert a significant and positive direct impact on disbursement progress, with CT1 and CT2 playing the most crucial role by monitoring the process from planning, appraisal and approval to project implementation. The fifth indicator, CT5 (corrective actions), does not have a direct statistically significant effect but shows an indirect influence by strengthening the overall monitoring and control system. The study underscores the importance of establishing a comprehensive and continuous capital plan control mechanism, combined with a rapid feedback and corrective action process, to enhance the efficiency of public investment disbursement.

Keywords: Capital plan contro; public investment disbursement; road transport infrastructure; monitoring and evaluation; corrective actions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Giải ngân vốn đầu tư công là một trong những nhiệm vụ trọng tâm trong quản lý ngân sách nhà nước, có ảnh hưởng trực tiếp đến tiến độ thực hiện các dự án hạ tầng và mục tiêu phát triển kinh tế - xã hội [1]. Thực tiễn ở Việt Nam cho thấy tiến độ giải ngân vốn đầu tư công nhiều năm chưa đạt kỳ vọng, đặc biệt trong lĩnh vực giao thông đường bộ - lĩnh vực chiếm tỷ trọng lớn trong tổng vốn đầu tư công. Tình trạng chậm giải ngân không chỉ làm tăng chi phí dự án, kéo dài thời gian hoàn thành công trình mà còn ảnh hưởng đến khả năng phát triển kết cấu hạ tầng và hiệu quả sử dụng vốn ngân sách.

Một trong những nguyên nhân quan trọng dẫn đến chậm giải ngân là công tác kiểm soát kế hoạch vốn chưa được thực hiện đồng bộ, chưa phát huy đầy đủ vai trò của theo dõi, giám sát và đánh giá. Nhiều dự án chỉ tập trung vào khâu lập kế hoạch và phê duyệt vốn mà thiếu cơ chế giám sát liên tục trong quá trình triển khai, dẫn đến phát hiện sai lệch muộn và xử lý chậm trễ.

Nghiên cứu này nhằm khắc phục khoảng trống nói trên bằng cách xây dựng và kiểm định mô hình đánh giá tác động của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn (với 5 chỉ tiêu CT1-CT5) đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp định lượng mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố kiểm soát mà còn chỉ ra vai trò của cơ chế phản hồi, điều chỉnh kịp thời, từ đó đưa ra các hàm ý chính sách nhằm cải thiện hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khung nghiên cứu và mô hình đề xuất

Nghiên cứu này tập trung đánh giá tác động của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ. Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trong và ngoài nước [2-4] về quản lý vốn đầu tư công, quản lý dự án và kiểm soát tiến độ, nhóm tác giả xây dựng khung nghiên cứu với 5 chỉ tiêu phản ánh mức độ kiểm soát kế hoạch vốn, bao gồm:

- CT1: Theo dõi quá trình lập, thẩm định, phê duyệt và triển khai kế hoạch vốn;
- CT2: Theo dõi toàn bộ quá trình thực hiện dự án;
- CT3: Phát hiện kịp thời các khoản nợ đọng, thất thoát hoặc sử dụng vốn sai mục đích;
- CT4: Đánh giá nguyên nhân chậm giải ngân, xác định trách nhiệm của các bên liên quan;
- CT5: Thực hiện các hành động khắc phục và điều chỉnh sai lệch.

Các chỉ tiêu này được sử dụng làm biến độc lập trong mô hình hồi quy, với giả thuyết nghiên cứu rằng mức độ kiểm soát kế hoạch vốn càng cao thì tiến độ giải ngân càng được cải thiện. Tiến độ giải ngân vốn đầu tư công được đo lường bằng tỷ lệ giải ngân thực tế so với kế hoạch và mức độ đáp ứng tiến độ theo thời gian.

2.2. Thu thập dữ liệu

Dữ liệu sơ cấp được thu thập thông qua khảo sát bằng bảng hỏi cấu trúc, tập trung vào các cán bộ trực tiếp tham gia quản lý, điều hành hoặc giám sát vốn đầu tư công trong lĩnh vực giao thông đường bộ. Mẫu khảo sát được phân bổ hợp lý nhằm phản ánh quan điểm của nhiều bên liên quan, bao gồm: Ban quản lý dự án (74 mẫu), cơ quan quản lý vốn đầu tư xây dựng (29 mẫu), cơ quan kế hoạch (13 mẫu), cơ quan tài chính (7 mẫu) và Kiểm toán Nhà nước (13 mẫu). Sau quá trình rà soát và làm sạch dữ liệu, thu được 136 mẫu hợp lệ.

Bảng hỏi được thiết kế với thang đo Likert 5 mức (từ 1 - Hoàn toàn không đồng ý đến 5 - Hoàn toàn đồng ý) để đo lường nhận định của người trả lời về mức độ thực hiện các chỉ tiêu kiểm soát kế hoạch vốn và đánh giá tiến độ giải ngân. Để bảo đảm tính rõ ràng và phù hợp bối cảnh Việt Nam, bảng hỏi được thử nghiệm sơ bộ trước khi tiến hành khảo sát chính thức.

2.3. Phương pháp phân tích

Dữ liệu thu thập được xử lý bằng phần mềm SmartPLS 3.0. Các bước phân tích bao gồm:

- Kiểm định độ tin cậy thang đo bằng Cronbach's Alpha và hệ số tương quan biến - tổng (Corrected Item-Total Correlation);
- Phân tích nhân tố khám phá (EFA) nhằm xác nhận cấu trúc các chỉ tiêu quan sát;
- Phân tích hồi quy tuyến tính bội để xác định mức độ tác động của từng chỉ tiêu kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

Kết quả phân tích hồi quy (Hình 1) cho thấy mô hình nghiên cứu giải thích được 42,4% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân vốn đầu tư công (Adjusted R^2 = 0,424), mức giải thích này có ý nghĩa thống kê, khẳng định rằng hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định tốc độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ.

** Các yếu tố có tác động trực tiếp:*

Bốn chỉ tiêu CT1, CT2, CT3, CT4 phản ánh nhóm hoạt động theo dõi, kiểm tra, giám sát và đánh giá (KS) có sự hội tụ tốt, đạt yêu cầu về độ tin cậy Cronbach's Alpha và Composite Reliability, chứng minh rằng chúng đo lường nhất quán bản chất của biến tiềm ẩn KS. Phân tích hồi quy chỉ ra rằng biến tiềm ẩn KS có tác động trực tiếp, tích cực và có ý nghĩa thống kê đến tiến độ giải ngân vốn. Điều này cho thấy khi công tác theo dõi, kiểm tra và giám sát được thực hiện chặt chẽ, kịp thời, minh bạch, tiến độ giải ngân được cải thiện rõ rệt.

Đặc biệt, CT1 và CT2 (theo dõi quá trình lập, thẩm định, phê duyệt và triển khai kế hoạch vốn, cùng theo dõi toàn bộ quá trình thực hiện dự án) là hai chỉ tiêu có hệ số tác động cao nhất. Kết quả này hàm ý rằng quản lý tốt giai đoạn đầu (lập, phê duyệt và triển khai) và duy trì giám sát liên tục trong quá trình thực hiện dự án có vai trò quyết định để tránh ách tắc, chậm giải ngân. CT3 và CT4 liên quan đến việc phát hiện và xử lý nợ đọng, thất thoát và đánh giá nguyên nhân chậm trễ, giúp nâng cao tính minh bạch và giảm thiểu lãng phí, cũng góp phần cải thiện tiến độ.

** Vai trò của chỉ tiêu CT5:*

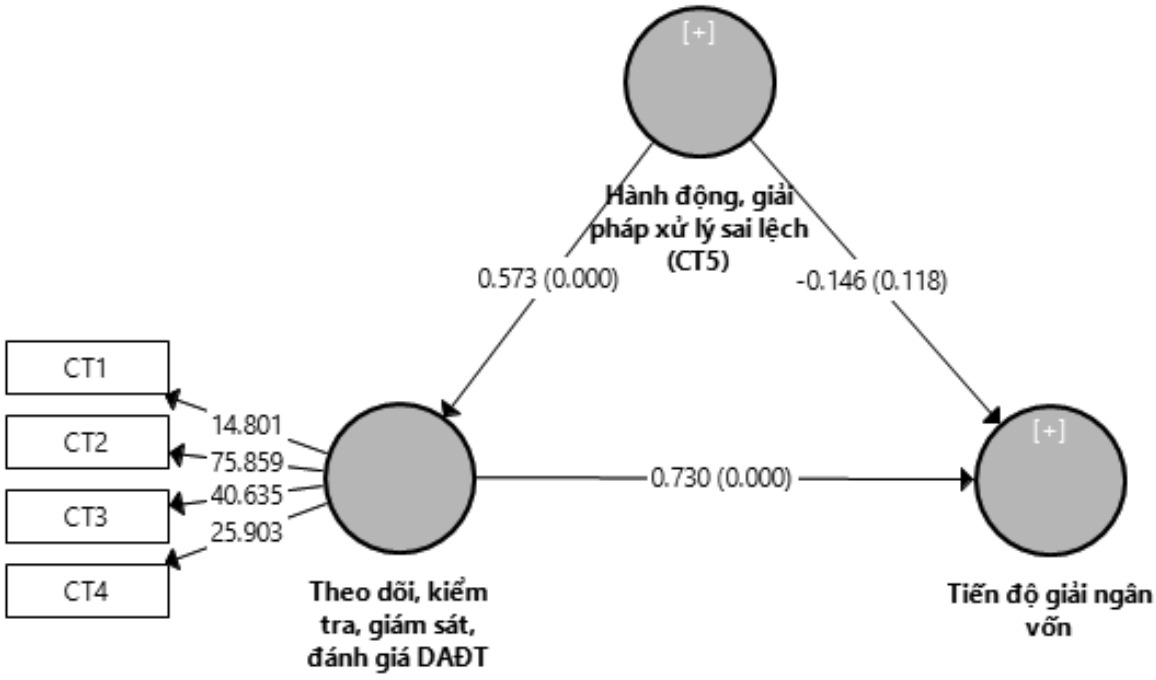
Chỉ tiêu CT5 (thực hiện hành động khắc phục và điều chỉnh sai lệch) có ảnh hưởng gián tiếp đến tiến độ giải ngân thông qua biến KS, nghĩa là CT5 tác động chủ yếu bằng cách nâng cao hiệu quả giám sát, kiểm tra và thúc đẩy hành động khắc phục kịp thời. Điều này gợi ý rằng việc thiết lập quy trình phản hồi nhanh khi phát hiện sai lệch là yếu tố then chốt để bảo đảm kế hoạch vốn được thực hiện đúng tiến độ.

Kết quả nghiên cứu cho thấy công tác kiểm soát kế hoạch vốn có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả giải ngân. Khi các quy trình theo dõi, giám sát được triển khai bài bản, có hệ thống, việc phát hiện sớm sai lệch và đưa ra biện pháp xử lý kịp thời giúp giảm thiểu chậm trễ và nâng cao hiệu quả sử dụng vốn. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu quốc tế về quản lý dự án [3, 4], trong đó nhấn mạnh vai trò của giám sát - kiểm soát như một trụ cột trong quản lý dự án nhằm đảm bảo các mục tiêu về thời gian, chi phí và chất lượng.

Ngoài ra, kết quả nghiên cứu gợi ý rằng chỉ kiểm soát thụ động là chưa đủ; cần có cơ chế phản hồi và hành động điều chỉnh nhanh (CT5) để khép kín vòng kiểm soát. Điều này đặc biệt quan trọng

trong bối cảnh dự án giao thông đường bộ thường có quy mô lớn, nhiều bên tham gia và chịu rủi ro thay đổi về giá cả, nguồn vốn. Việc bổ sung cơ chế xử lý sai lệch giúp hạn chế kéo dài thời gian điều chỉnh, giảm thiểu tình trạng chậm giải ngân do thủ tục phức tạp.

Nhìn chung, mô hình nghiên cứu đã chỉ ra tầm quan trọng của một hệ thống kiểm soát kế hoạch vốn đồng bộ, trong đó bao gồm theo dõi liên tục, giám sát chất lượng, đánh giá định kỳ và hành động khắc phục nhanh chóng. Đây là cơ sở để kiến nghị các giải pháp hoàn thiện cơ chế kiểm soát nhằm thúc đẩy tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong lĩnh vực giao thông đường bộ.



Hình 1. Mô hình ảnh hưởng

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã kiểm định mô hình ảnh hưởng của hoạt động kiểm soát kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án xây dựng giao thông đường bộ tại Việt Nam. Kết quả hồi quy cho thấy mô hình giải thích được 42,4% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân (Adjusted R^2 = 0,424), trong đó các chỉ tiêu CT1, CT2, CT3, CT4 có tác động trực tiếp, tích cực và có ý nghĩa thống kê đến tiến độ giải ngân. Đặc biệt, CT1 (theo dõi quá trình lập, thẩm định, phê duyệt, triển khai kế hoạch vốn) và CT2 (theo dõi toàn bộ quá trình thực hiện dự án) có hệ số tác động cao nhất, khẳng định vai trò then chốt của giám sát liên tục từ giai đoạn chuẩn bị đến triển khai thực hiện. Chỉ tiêu CT5 (hành động khắc phục) chưa có tác động trực tiếp đáng kể, song đóng vai trò hỗ trợ gián tiếp, gợi ý cần cải thiện cơ chế phản hồi và điều chỉnh kịp thời khi phát hiện sai lệch.

** Hàm ý chính sách:*

Kết quả nghiên cứu cho thấy, muốn đẩy nhanh tiến độ giải ngân vốn đầu tư công, cần thiết lập hệ thống kiểm soát kế hoạch vốn toàn diện và liên tục. Cụ thể:

- Tăng cường theo dõi ngay từ giai đoạn lập và phê duyệt kế hoạch vốn nhằm phát hiện sớm các vướng mắc về thủ tục, bảo đảm kế hoạch sát thực tế và khả thi;

- Duy trì cơ chế giám sát định kỳ trong suốt quá trình thực hiện dự án, ứng dụng công nghệ số để theo dõi tiến độ theo thời gian thực, kịp thời cảnh báo khi có nguy cơ chậm trễ;

- Hoàn thiện cơ chế đánh giá nguyên nhân chậm giải ngân và yêu cầu báo cáo công khai, minh bạch, từ đó có giải pháp điều chỉnh kịp thời;

- Thiết lập quy trình hành động khắc phục nhanh (CT5) với thẩm quyền rõ ràng để xử lý ngay các sai lệch, tránh kéo dài dẫn đến chậm giải ngân;

Việc áp dụng đồng bộ các giải pháp trên không chỉ cải thiện hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công mà còn nâng cao trách nhiệm giải trình, hạn chế thất thoát, lãng phí và tạo niềm tin cho xã hội vào công tác quản lý đầu tư công.

** Nghiên cứu trong tương lai có thể mở rộng theo các hướng:*

- Bổ sung các biến quan sát phản ánh chất lượng hệ thống thông tin quản lý và mức độ minh bạch dữ liệu giải ngân để đánh giá tác động sâu hơn đến tiến độ giải ngân;

- Kết hợp phân tích định tính (phỏng vấn sâu, nghiên cứu tình huống) nhằm làm rõ cơ chế tác động của CT5 và đề xuất giải pháp hoàn thiện quy trình phản hồi - điều chỉnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đỗ Văn Thuận và Nguyễn Lương Hải. Đánh giá hiệu quả điều hành kế hoạch vốn đầu tư công trong xây dựng cơ sở hạ tầng giao thông tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 12, tr. 213-215, 2025.

[2] Trần Tuấn Phong và Nguyễn Lương Hải. Xây dựng các chỉ tiêu đánh giá hoạt động kiểm soát vốn đầu tư công xây dựng công trình giao thông tại Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 8, tr. 120-122, 2025.

[3] British Standard. Project Management - Guide to project management, BS 6079-1996, (in eng), Publisher BSI 1996, 1996.

[4] PMBOK and Guide. A Guide to the Project Management Body of Knowledge, (in eng), 5th Edition. Project Management Institute 2013, Inc., 2013.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 24/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/4/2026

Một số vấn đề về tổ chức giao thông bằng vạch sơn, biển báo trên đường ô tô cao tốc ở Việt Nam

Issues in traffic organization using pavement markings and traffic signs on expressways in Vietnam

> TS VŨ MINH TÂM*, TS THÁI HỒNG NAM
Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: tamvm@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo chỉ ra rằng hệ thống tổ chức giao thông bằng vạch sơn, biển báo trên đường cao tốc đoạn cơ bản, nút giao trên các đường cao tốc ở Việt Nam còn tồn tại nhiều bất cập, chưa thống nhất giữa các đường cao tốc với nhau cũng như giữa các đoạn của cùng một tuyến đường cao tốc. Bài báo cũng đề xuất một số giải pháp nhằm nâng cao tính đồng bộ và hiệu quả của hệ thống báo hiệu giao thông trên đường cao tốc. Cụ thể, cần thường xuyên rà soát, cập nhật các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ, đồng thời kiểm tra và thay thế các biển báo, vạch sơn đã cũ hoặc không còn phù hợp trên các tuyến đang khai thác. Bên cạnh đó, cần xây dựng hướng dẫn thiết kế hoặc bộ thiết kế điển hình về tổ chức giao thông trên đường cao tốc, đặc biệt tại các đoạn cơ bản và khu vực nút giao, nhằm đảm bảo áp dụng thống nhất trong thiết kế và quản lý khai thác.

Từ khóa: Đường ô tô cao tốc; nút giao; tổ chức giao thông; vạch sơn; biển báo.

ABSTRACT

This paper indicates that the traffic control system based on pavement markings and traffic signs on basic freeway segments and interchanges of expressways in Vietnam still presents several shortcomings. In particular, the organization of traffic control devices is not yet consistent among different expressways, nor among different sections of the same expressway corridor. Based on these findings, the paper proposes several measures to improve the consistency and effectiveness of traffic control systems on expressways. Specifically, it is necessary to regularly review and update the national technical standards for road traffic signs and markings, while also inspecting and replacing outdated or non-compliant signs and pavement markings on existing expressways. In addition, the development of design guidelines or standard design templates for traffic organization on expressways, particularly for basic segments and interchange areas, is recommended to ensure consistent application in design, construction and operational management.

Keywords: Expressway; interchange; traffic organization; pavement markings; traffic signs.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống biển báo chỉ dẫn trên đường cao tốc ở Việt Nam đã có nhiều thay đổi qua các giai đoạn tiêu chuẩn và quy chuẩn kỹ thuật. Sau khi tiêu chuẩn ngành 22 TCN 237-01 [1], 22 TCN 331-05 [2] được ban hành và áp dụng trong một thời gian dài, hệ thống biển báo chỉ dẫn cao tốc đã được cập nhật và hoàn thiện trong QCVN 83:2015/BGTVT [3], đánh dấu bước điều chỉnh đầu tiên đối với hệ thống biển báo dành riêng cho đường cao tốc. Sau đó, các quy định liên quan tiếp tục được rà soát, chỉnh sửa và tích hợp trong các phiên bản QCVN 41:2016 [4], QCVN 41:2019 [5] và gần đây nhất là QCVN 41:2024 [6], trong đó Chương 9 quy định chi tiết về hệ thống biển chỉ dẫn trên đường cao tốc, đặc biệt tập trung vào tổ chức thông tin tại các khu vực lối ra và lối vào của tuyến. Các biển báo trong QCVN 41 cơ bản tuân thủ Công ước Viên 1968 [7].

Mặc dù hệ thống quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ đã được ban hành và từng bước hoàn thiện thông qua các lần cập nhật của QCVN 41, tuy nhiên trong thực tế việc tổ chức giao thông trên các tuyến đường cao tốc ở Việt Nam vẫn còn tồn tại một số hạn chế nhất định. Những hạn chế này chủ yếu liên quan

đến việc áp dụng hệ thống biển báo và vạch kẻ đường chưa thật sự thống nhất và đồng bộ trên toàn mạng lưới cao tốc. Trên thực tế, do nhiều tuyến cao tốc được đầu tư và xây dựng trong các giai đoạn khác nhau, dưới sự quản lý của các chủ đầu tư và đơn vị khai thác khác nhau, nên việc áp dụng quy chuẩn báo hiệu giao thông đôi khi chưa đồng nhất, dẫn đến sự khác biệt trong cách bố trí biển báo, ký hiệu và vạch kẻ đường giữa các tuyến. Bên cạnh đó, ngay trong phạm vi cùng một tuyến cao tốc, sự đồng bộ về tổ chức giao thông cũng chưa được đảm bảo hoàn toàn, đặc biệt tại các đoạn tuyến được xây dựng hoặc đưa vào khai thác ở các thời điểm khác nhau. Ngoài ra, một số tuyến cao tốc cũ vẫn chưa được cập nhật đầy đủ theo các quy định mới của QCVN 41, dẫn đến tình trạng hệ thống báo hiệu chưa phù hợp với điều kiện khai thác hiện nay, từ đó có thể gây khó khăn cho người tham gia giao thông và ảnh hưởng đến mức độ an toàn khi lưu thông trên đường cao tốc.

Do đó, việc rà soát, chuẩn hóa và đồng bộ hóa hệ thống báo hiệu giao thông theo các quy chuẩn hiện hành là một yêu cầu cần thiết nhằm nâng cao chất lượng tổ chức giao thông và đảm bảo an toàn cho người tham gia giao thông trên các tuyến đường cao tốc.

2. MỘT SỐ BẤT CẬP VỀ TỔ CHỨC GIAO THÔNG BẰNG VẠCH SƠN, BIỂN BÁO TRÊN ĐOẠN CƠ BẢN CỦA ĐƯỜNG CAO TỐC

Hiện nay, việc kiểm soát tốc độ trên các tuyến đường cao tốc ở Việt Nam chủ yếu được thực hiện thông qua hệ thống biển báo cố định, điển hình là biển IE.452 và các biển P.127 kết hợp với R.306 để quy định tốc độ tối đa và tối thiểu cho phương tiện. Tuy nhiên, khảo sát thực tế cho thấy việc bố trí các biển kiểm soát tốc độ trên một số tuyến cao tốc vẫn chưa thống nhất và đồng bộ về quy cách cũng như vị trí lắp đặt (Hình 1). Bên cạnh đó, tại một số tuyến còn xuất hiện tình trạng bố trí biển báo trùng lặp, làm giảm tính hợp lý của hệ thống báo hiệu giao thông. Chẳng hạn, trên tuyến Hà Nội - Hải Phòng (CT.04), mặc dù đã bố trí biển IE.452 cho từng làn xe nhưng phía trước vẫn đặt thêm cặp biển P.127 và R.306, dẫn đến việc lặp lại thông tin không cần thiết. Ngoài ra, trên một số tuyến cao tốc được xây dựng từ giai đoạn trước như Pháp Vân - Cầu Giẽ và Cầu Giẽ - Ninh Bình, hệ thống biển báo đã cũ và chưa được cập nhật theo quy chuẩn mới.

a) - Cao tốc Hà Nội - Hải Phòng

b) - Cao tốc Pháp Vân - Cầu Giẽ

c) - Cao tốc Cầu Giẽ - Ninh Bình

d) - Cao tốc Bắc Giang - Lạng Sơn

e) - Cao tốc Mai Sơn - QL45

Hình 1. Bố trí biển báo cố định kiểm soát tốc độ, phân làn đường trên cao tốc

Bên cạnh hệ thống biển báo cố định, QCVN 41:2024 (Điều 14) cũng quy định về biển báo giao thông có thông tin thay đổi (VMS), cho phép hiển thị và cập nhật thông tin giao thông theo thời gian thực như tình trạng lưu thông, tai nạn, thời tiết bất lợi hoặc khuyến nghị điều tiết giao thông. Tuy nhiên hiện nay, việc triển khai VMS trên các tuyến cao tốc ở Việt Nam vẫn còn hạn chế, mới chỉ xuất hiện trên một số tuyến như Hà Nội - Hải Phòng (CT.04), Bắc - Nam phía Đông (CT.01) và Biên Hòa - Vũng Tàu (CT.28) (Hình 2). Ngoài ra, khoảng cách bố trí giữa các biển VMS còn khá lớn, chưa bảo đảm mật độ cần thiết để cung cấp thông tin liên tục, làm giảm hiệu quả của hệ thống trong việc truyền tải thông tin giao thông theo thời gian thực.

a) - Cao tốc Hà Nội - Hải Phòng

b) - Cao tốc QL45 - Nghi Sơn

c) - Cao tốc Pháp Vân - Cầu Giẽ

d) - Cao tốc Biên Hòa - Vũng Tàu (nguồn: google maps)

Hình 2. Biển báo VMS trên một số tuyến cao tốc ở Việt Nam

Trên đoạn cơ bản, một số biển thông tin còn được sử dụng để nhắc nhở người lái xe duy trì khoảng cách an toàn (KCAT) giữa các phương tiện, góp phần nâng cao ý thức và đảm bảo an toàn khi lưu thông ở tốc độ cao. Một số bất cập liên quan đến tổ chức báo hiệu về KCAT trên đường cao tốc hiện vẫn tồn tại trong thực tế (Hình 3). Trước hết, QCVN 41:2024 chưa quy định cụ thể về quy cách các biển chỉ dẫn ghi khoảng cách ngắn (0 m, 50 m, 100 m…), mặc dù loại biển này đã được bố trí trên một số tuyến cao tốc, do đó cần được chuẩn hóa để áp dụng thống nhất. Bên cạnh đó, hệ thống biển báo và vạch sơn chỉ dẫn KCAT hiện chủ yếu được bố trí tại vị trí bắt đầu đường cao tốc, trong khi mật độ bố trí dọc tuyến chưa được quy định thống nhất. Ở một số vị trí còn xuất hiện tình trạng bố trí biển IE.471 nhưng không kèm theo hệ thống vạch sơn hoặc biển chỉ dẫn khoảng cách, làm giảm hiệu quả cung cấp thông tin. Ngoài ra, KCAT được thể hiện trên một số tuyến chưa thống nhất giữa các tuyến có cùng tốc độ khai thác, thậm chí chưa phù hợp với quy định tại Thông tư 38/2024/TT-BGTVT [8]. Đồng thời, một số tuyến vạch 7.8 chưa được cập nhật theo quy định hiện hành của QCVN 41:2024.

a) - Chưa bố trí biển khoảng cách, vạch 7.8

b) - KCAT 50 m trên tuyến cao tốc Diễn Châu - Bãi Vọt (tốc độ khai thác tối đa 90 km/h)

c) - KCAT 50 m trên tuyến cao tốc Cầu Giẽ - Ninh Bình (tốc độ khai thác tối đa 120 km/h)

d) - KCAT 100 m trên tuyến cao tốc Hà Nội - Hải Phòng (tốc độ khai thác tối đa 120 km/h) (nguồn: google maps)

e) - Vạch 7.8 sai quy cách

Hình 3. Một số tồn tại về hệ thống thông tin KCAT trên cao tốc

Trên đoạn cơ bản cần bố trí các vị trí quay đầu khẩn cấp tại dải phân cách (DPC) giữa, nhằm phục vụ cho các phương tiện chức năng như xe cứu hộ, xe tuần tra hoặc phương tiện xử lý sự cố tiếp cận hiện trường nhanh chóng. Tuy nhiên trên thực tế, hệ thống DPC di động tại các vị trí quay đầu khẩn cấp hiện chưa được tiêu chuẩn hóa, tồn tại nhiều loại kết cấu và phương thức lắp đặt khác nhau (Hình 4). Trong một số trường hợp, việc tháo lắp còn phức tạp và mất nhiều thời gian, làm giảm hiệu quả sử dụng và ảnh hưởng đến khả năng phản ứng nhanh của lực lượng chức năng khi xảy ra sự cố trên tuyến cao tốc.

a) - DPC di động dạng cột luồn cáp

b) - DPC di động dạng DPC giảm chấn

c) - DPC di động dạng tôn lượn sóng

d) - DPC di động dạng lùa xếp

e) - DPC di động dạng hỗn hợp

Hình 4. Các dạng DPC di động sử dụng tại vị trí quay đầu khẩn cấp

3. MỘT SỐ BẤT CẬP VỀ TỔ CHỨC GIAO THÔNG BẰNG VẠCH SƠN, BIỂN BÁO TẠI CÁC NÚT GIAO TRÊN ĐƯỜNG CAO TỐC

Tại khu vực nút giao trên đường cao tốc, mật độ biển báo thường lớn, do đó việc bố trí hợp lý nhằm đảm bảo tầm nhìn và tránh che khuất lẫn nhau là rất cần thiết để người điều khiển phương tiện nhận biết thông tin kịp thời khi di chuyển với tốc độ cao. Tuy nhiên, trên một số tuyến cao tốc hiện nay, việc lắp đặt biển báo tại nút giao vẫn chưa hợp lý, dẫn đến tình trạng che khuất hoặc chồng lấn thông tin. Tình trạng này có thể quan sát tại nút giao trên tuyến Long Thành - Dầu Giây và Mai Sơn - QL45 (Hình 5), nơi một số biển báo được bố trí chưa tối ưu, ảnh hưởng đến khả năng quan sát của người tham gia giao thông.

Hình 5. Biển báo che khuất lẫn nhau

Theo QCVN 41:2024, trước khi đến nút giao trên đường cao tốc cần bố trí biển IE.454 để chỉ dẫn khoảng cách đến lối ra phía trước. Tùy theo quy mô nút giao, có thể bố trí một biển cách nút 1,0 km hoặc hai biển lần lượt cách 2,0 km và 1,0 km. Tuy nhiên, quy định này trong thực tế dẫn đến sự không thống nhất trong việc bố trí biển IE.454 giữa các tuyến. Ví dụ trên tuyến Bắc Giang - Lạng Sơn (CT.03), hai nút giao Mẹt và Vôi có quy mô tương tự nhưng cách bố trí biển khác nhau (Hình 6). Ngoài ra, tại một số tuyến, biển IE.454 còn được đặt quá xa nút giao, như trên Đại lộ Thăng Long (4,5 km) và tuyến Nghi Sơn - Diễn Châu (3,0 km), làm giảm hiệu quả cung cấp thông tin cho người tham gia giao thông (Hình 7).

Hình 6. Sự khác nhau về số biển IE.454 trên cao tốc Bắc Giang - Lạng Sơn (nguồn: google maps)

Hình 7. Biển IE.454 đặt quá xa nút

Hình 8. Biển IE.454 cũ, sai quy cách

Bên cạnh đó, một số tuyến cao tốc vẫn sử dụng hệ thống biển chỉ dẫn cũ, không đúng quy cách của quy chuẩn hiện hành (Hình 8). Cần phải rà soát, cập nhật loại hình biển để đảm bảo tính thống nhất trên toàn tuyến cũng như thống nhất với các tuyến khác.

Các nhánh ra của đường cao tốc thường có quy mô nhỏ hơn, bán kính cong nhỏ, tốc độ khai thác thấp hơn so với tuyến chính. Vì vậy, việc kiểm soát tốc độ trước khi phương tiện đi vào nhánh ra là cần thiết. Tuy nhiên, khảo sát thực tế cho thấy việc tổ chức kiểm soát tốc độ tại các nhánh ra trên các tuyến cao tốc hiện nay chưa thống nhất. Cụ thể, tại một số tuyến như Phan Thiết - Dầu Giây (Hình 9a), khu vực nhánh ra chưa bố trí giải pháp kiểm soát tốc độ rõ ràng, trong khi ở một số tuyến khác chỉ sử dụng biển cảnh báo W.245 "Đi chậm" (Hình 9b), nhưng không cung cấp thông tin cụ thể về tốc độ khai thác an toàn của nhánh ra. Ngoài ra, một số tuyến áp dụng hệ thống biển hạn chế tốc độ P.127 giảm dần theo từng cấp nhưng không kèm biển phụ S.509 để xác định phạm vi áp dụng cho nhánh ra (Hình 9c), dễ gây hiểu nhầm rằng giới hạn tốc độ áp dụng cho toàn bộ đoạn tuyến. Trong một số trường hợp khác, biển R.301d được bố trí kết hợp với biển P.127 (Hình 9d), có thể khiến người điều khiển phương tiện hiểu rằng bắt buộc phải rẽ phải tại vị trí đó. Trong khi đó, một số tuyến cao tốc áp dụng phương án giảm dần tốc độ bằng biển P.127 kết hợp biển phụ S.509 ghi chú "Lối ra" (Hình 9e) - đây là cách bố trí hợp lý hơn cả.

a) - Không kiểm soát tốc độ

b) - Chỉ bố trí biển Đi chậm

c) - Bố trí biển P.127 nhưng không có biển phụ

d) - Bố trí biển P.127 kèm biển hiệu lệnh R.301d

e) - Bố trí biển P.127 kèm biển phụ S.509

Hình 9. Các biển kiểm soát tốc độ tại lối ra (nguồn: google maps)

Để chỉ dẫn địa danh tại các nhánh ra, QCVN41:2024 quy định tại dải phân ngã ba của nhánh rẽ bố trí biển IE.464b. Tuy nhiên hiện nay, nhiều tuyến đường cao tốc chưa bố trí biển này (Hình 10a) hoặc bố trí không đúng vị trí (Hình 10b).

a) - Không bố trí biển IE.464b

b) - Biển IE.464b bố trí sai vị trí

Hình 10. Chưa bố trí hoặc bố trí chưa hợp lý biển IE.464b (nguồn: google maps)

Tại các vị trí tách và nhập làn trên đường cao tốc, các vạch sơn kênh hóa (vạch 4.2) thường được bố trí tại đầu mũi tách - nhập nhằm định hướng và phân tách các dòng giao thông. Tuy nhiên, trên một số tuyến cao tốc, việc bố trí các vạch này chưa hợp lý, gây khó khăn cho người tham gia giao thông khi thực hiện thao tác tách, nhập làn (Hình 11a). Bên cạnh đó, trong điều kiện phương tiện di chuyển với tốc độ cao, đặc biệt vào ban đêm hoặc khi tầm nhìn hạn chế, việc tăng cường khả năng nhận diện khu vực kênh hóa là rất cần thiết. Thực tế cho thấy, việc tổ chức báo hiệu tại các vị trí này còn chưa thống nhất giữa các tuyến, khi nhiều nơi chỉ sử dụng vạch sơn phản quang, trong khi một số vị trí đã bổ sung đinh phản quang hoặc cọc tiêu mềm phản quang (Hình 11b, c, d).

a) - Vạch sơn kênh hóa không hợp lý (nguồn: google maps)

b) - Vạch sơn kênh hóa không bố trí thiết bị phản quang

c) - Bố trí cọc tiêu mềm trên vạch kênh hóa (nguồn: google maps)

d) - Bố trí đinh phản quang trên vạch kênh hóa

Hình 11. Vạch kênh hóa tại vị trí tách, nhập làn

Theo QCVN 41:2024, trước khi đến vị trí nhập làn cần bố trí các biển IE.467a, IE.467b bên phải lề đường cao tốc nhằm cảnh báo cho phương tiện trên tuyến chính về khu vực có xe nhập vào cao tốc. Tuy nhiên, trên thực tế, nhiều tuyến cao tốc chưa bố trí đầy đủ các biển này trước vị trí nhập làn (Hình 12a). Ở một số trường hợp, biển IE.467a lại được đặt trên đoạn tăng tốc của nhánh nhập làn (Hình 12b), chưa phù hợp với mục đích cảnh báo cho phương tiện trên tuyến chính. Ngoài ra, tại nhiều vị trí khoảng cách giữa biển IE.467b và IE.467a còn quá gần nhau (Hình 12c), làm giảm hiệu quả cung cấp thông tin cho người tham gia giao thông.

a) - Không bố trí biển nhập làn

b) - Biển nhập làn đặt sai vị trí

c) - Biển IE.467b bố trí quá gần biển IE.467a

Hình 12. Bố trí biển IE.467a,b tại vị trí nhập làn

Theo QCVN 41:2024, tại vị trí bắt đầu cao tốc từ nút giao cần lắp đặt biển IE.452 chỉ dẫn bắt đầu đường cao tốc kết hợp với biển IE.465 chỉ dẫn địa điểm và khoảng cách. Tuy nhiên, khảo sát thực tế cho thấy trên nhiều tuyến cao tốc việc bố trí các biển này chưa đầy đủ và chưa thống nhất: Một số vị trí chưa lắp đặt theo quy định (Hình 13a, b), một số tuyến vẫn sử dụng biển cũ không đúng quy cách (Hình 13c) hoặc lựa chọn loại biển chưa phù hợp, như sử dụng IE.455 thay cho IE.465 (Hình 13d). Những bất cập này làm giảm hiệu quả cung cấp thông tin và tính thống nhất của hệ thống báo hiệu trên đường cao tốc.

a) - Thiếu biển IE.452 và IE.465

b) - Thiếu biển IE.465

c) - Biển cũ, sai quy cách

d) - Sử dụng biển chưa phù hợp

Hình 13. Vị trí bắt đầu cao tốc từ nhánh nhập làn

Tại các tuyến kết nối vào nút giao đường cao tốc, việc bố trí hệ thống biển chỉ dẫn có vai trò quan trọng trong việc cung cấp thông tin định hướng cho người tham gia giao thông khi tiếp cận lối vào cao tốc. Các biển thường sử dụng gồm IE.450a,b (chỉ dẫn sơ đồ và khoảng cách đến nút giao với đường dẫn vào cao tốc) và IE.451a,b (chỉ dẫn lối vào và khoảng cách đến lối vào cao tốc). Tuy nhiên, khảo sát thực tế cho thấy, tại nhiều nút giao, việc bố trí các biển này chưa đầy đủ hoặc chưa hợp lý (Hình 14). Một số vị trí chưa lắp đặt biển IE.450b, trong khi ở các vị trí khác biển IE.451b được đặt kết hợp với biển cấm phương tiện ngay trước vị trí rẽ, dễ gây hiểu nhầm về phạm vi áp dụng. Ngoài ra, có trường hợp bố trí hai biển IE.451b trên các nhánh vào cao tốc nhưng không kèm biển chỉ dẫn hướng đi (IE.464), làm thiếu thông tin định hướng cần thiết.

a) - Thiếu biển IE.450b

b) - Biển IE.451b và biển cấm bố trí không phù hợp

c) - Biển IE.451b bố trí không phù hợp

d) - Biển IE.451b bố trí không phù hợp (nguồn: dantri.com.vn)

Hình 14. Bố trí biển IE.450a,b và IE.451a,b không phù hợp

4. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Qua quá trình khảo sát và đánh giá, bài báo đã chỉ ra một số bất cập trong tổ chức giao thông bằng hệ thống biển báo và vạch sơn trên các tuyến đường cao tốc, đặc biệt tại đoạn cơ bản và khu vực nút giao. Nguyên nhân của các tồn tại này có thể do một số quy định trong quy chuẩn kỹ thuật hiện hành còn chưa đầy đủ, hệ thống biển báo và vạch kẻ đường trên nhiều tuyến chưa được cập nhật kịp thời theo quy chuẩn mới, đồng thời quá trình thiết kế và thi công do nhiều đơn vị khác nhau thực hiện trong khi chưa có hướng dẫn hoặc thiết kế điển hình thống nhất.

Từ đó, bài báo đề xuất một số kiến nghị nhằm nâng cao tính đồng bộ và hiệu quả của hệ thống báo hiệu giao thông trên đường cao tốc. Cụ thể, cần thường xuyên rà soát và cập nhật các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ; tổ chức kiểm tra, thay thế các biển báo và vạch sơn đã cũ hoặc không còn phù hợp trên các tuyến đang khai thác; đồng thời xây dựng các hướng dẫn hoặc thiết kế điển hình về tổ chức giao thông trên đường cao tốc, đặc biệt tại các đoạn cơ bản và khu vực nút giao, nhằm đảm bảo áp dụng thống nhất trong thiết kế, thi công và quản lý khai thác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] 22 TCN 237 - 01. Điều lệ báo hiệu Đường bộ. Bộ Giao thông vận tải.

[2] 22 TCN 331 - 05. Biển chỉ dẫn trên đường cao tốc. Bộ Giao thông vận tải.

[3] QCVN 83-2015/BGTVT. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về biển chỉ dẫn trên đường cao tốc. Bộ Giao thông vận tải.

[4] QCVN 41:2016/BGTVT. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ. Bộ Giao thông vận tải.

[5] QCVN 41:2019/BGTVT. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ. Bộ Giao thông vận tải.

[6] QCVN 41:2024/BGTVT. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về báo hiệu đường bộ. Bộ Giao thông vận tải.

[7] 1968 Convention on Road Traffic (Vienna): Signed in Vienna on 8 November 1968.

[8] 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. Bộ Giao thông vận tải.

■Ngày nhận bài: 01/4/2026 ■Ngày sửa bài: 10/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 17/4/2026

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân TP Hà Nội

Research on factors influencing the electric motorcycle choice behavior of residents in Hanoi City

> KS LÊ THỊ NGỌC, TS HÀ THANH TÙNG*
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: tunght@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh Hà Nội đang triển khai các chính sách hạn chế phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch, xe máy điện được xem là giải pháp quan trọng nhằm phát triển giao thông bền vững. Nghiên cứu này nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân TP Hà Nội. Kết quả cho thấy hành vi lựa chọn xe máy điện chịu ảnh hưởng bởi các nhóm yếu tố chính gồm: Yếu tố kinh tế - tài chính, tâm lý - nhận thức, môi trường - chính sách và yếu tố cá nhân. Trong đó, yếu tố kinh tế và nhận thức về lợi ích có tác động mạnh nhất. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất các giải pháp nhằm thúc đẩy quá trình chuyển đổi phương tiện cá nhân theo hướng xanh tại Hà Nội.

Từ khóa: Xe máy điện; hành vi lựa chọn; giao thông xanh.

ABSTRACT

In the context of Hanoi's ongoing policies to restrict fossil fuel-powered vehicles, electric motorcycles are considered a crucial solution for sustainable transportation development. This study aims to identify factors influencing the choice of electric motorcycles among Hanoi residents. The results show that the choice of electric motorcycles is influenced by several main groups of factors: Economic and financial factors, psychological and cognitive factors, environmental and policy factors and personal factors. Among these, economic factors and perceived benefits have the strongest impact. Based on this, the study proposes solutions to promote the transition to green personal transportation in Hanoi.

Keywords: Electric motorbikes; choice behavior; green transportation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề ô nhiễm môi trường và ùn tắc giao thông tại các đô thị lớn, đặc biệt là Hà Nội đang trở nên ngày càng nghiêm trọng. Nhằm giảm thiểu phát thải và hướng tới phát triển bền vững, Chính phủ và chính quyền TP Hà Nội đã ban hành nhiều chính sách khuyến khích sử dụng phương tiện giao thông sử dụng năng lượng sạch, trong đó xe máy điện đóng vai trò quan trọng. Do đó, việc nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân là cần thiết nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc xây dựng chính sách và giải pháp phù hợp.

2. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết và các nghiên cứu liên quan

Hành vi lựa chọn phương tiện giao thông cá nhân, đặc biệt là phương tiện sử dụng năng lượng sạch như xe máy điện, chịu tác động của nhiều nhóm yếu tố: Kinh tế, tâm lý, xã hội và chính sách.

Về lý thuyết, mô hình Theory of Planned Behavior (TPB) cho rằng hành vi được quyết định bởi ý định, trong đó ý định chịu ảnh hưởng bởi thái độ, chuẩn mực xã hội và nhận thức kiểm soát. Bên cạnh đó, Technology Acceptance Model (TAM) nhấn mạnh vai trò của nhận thức về tính hữu ích và tính dễ sử dụng.

Các nghiên cứu chỉ ra rằng, chi phí, lợi ích môi trường và chính sách hỗ trợ là các yếu tố thúc đẩy chính; ngược lại, chi phí đầu tư cao, hạn chế hạ tầng là những rào cản lớn. Ngoài ra, yếu tố tâm lý và nhận thức đóng vai trò quan trọng nhưng không đủ mạnh nếu điều kiện kinh tế và tiện ích chưa đáp ứng.

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy hành vi lựa chọn xe máy điện chịu ảnh hưởng của các yếu tố kinh tế, tâm lý, xã hội và chính sách. Vì vậy, nghiên cứu này nhằm xây dựng mô hình tổng hợp các yếu tố ảnh hưởng, làm cơ sở cho đề xuất chính sách phát triển giao thông bền vững tại Hà Nội.

2.2. Mô hình nghiên cứu

Kế thừa các mô hình lý thuyết như TPB và TAM và tham khảo các kết quả nghiên cứu thực nghiệm, nghiên cứu đề xuất mô hình phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân tại Hà Nội. Mô hình được xây dựng theo hướng tích

hợp các yếu tố nội tại và yếu tố bên ngoài nhằm phản ánh toàn diện hành vi người tiêu dùng trong điều kiện thực tiễn. Cụ thể: Các nhóm yếu tố phản ánh các đặc điểm về nhân khẩu học và thói quen di chuyển của người sử dụng như độ tuổi, thu nhập, nghề nghiệp và tần suất sử dụng phương tiện. Các yếu tố này ảnh hưởng đến khả năng tiếp cận và nhu cầu sử dụng xe máy điện.

Mô hình nghiên cứu được sử dụng làm cơ sở để xây dựng thang đo, thiết kế bảng hỏi và kiểm định các mối quan hệ giữa các biến thông qua các phương pháp phân tích định lượng trong phần tiếp theo.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Thu thập dữ liệu

Dữ liệu nghiên cứu được thu thập thông qua khảo sát bằng bảng hỏi cấu trúc đối với người dân đang sinh sống và làm việc tại Hà Nội. Đối tượng khảo sát là những người có sử dụng xe máy hoặc có khả năng chuyển đổi sang xe máy điện trong tương lai.

Mẫu khảo sát được phân bố theo các khu vực không gian đô thị, bao gồm khu vực trong Vành đai 1, khu vực giữa Vành đai 1 và Vành đai 2, khu vực giữa Vành đai 2 và Vành đai 3 và khu vực ngoài Vành đai 3. Phương pháp chọn mẫu được sử dụng là chọn mẫu thuận tiện kết hợp với phân tầng theo khu vực.

Tổng số phiếu khảo sát hợp lệ thu được là 400 mẫu. Kích thước mẫu này đáp ứng yêu cầu tối thiểu đối với các phân tích thống kê đa biến, đồng thời đảm bảo độ tin cậy của kết quả nghiên cứu.

3.2. Phương pháp phân tích dữ liệu

Dữ liệu sau khi thu thập được làm sạch và xử lý bằng phần mềm STATA phiên bản 15.0 thông qua các bước phân tích sau: (1) Kiểm định độ tin cậy thang đo; (2) Phân tích nhân tố khám phá (EFA); (3) Phân tích hồi quy tuyến tính đa biến; (4) Kiểm định sự khác biệt; (5) Độ tin cậy và giá trị nghiên cứu.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Thống kê mô tả mẫu

Với cỡ mẫu 400 người, kết quả thống kê mô tả cho thấy mẫu nghiên cứu có sự phân bố tương đối đa dạng theo các đặc điểm cá nhân. Về giới tính, nữ chiếm 55,7% và nam chiếm 44,3%, cho thấy sự quan tâm đến xe máy điện xuất hiện ở cả hai giới, không có sự chênh lệch quá lớn. Về độ tuổi, nhóm từ 16 đến dưới 25 (27,5%) và 25 - 34 tuổi (26,3%) chiếm tỷ trọng lớn, phản ánh mẫu nghiên cứu chủ yếu là người trẻ, dễ tiếp cận công nghệ và quan tâm đến chi phí cũng như môi trường. Xét theo nghề nghiệp, cán bộ viên chức/văn phòng chiếm cao nhất (44,8%), học sinh/sinh viên (27,3%), đều là các nhóm có nhu cầu đi lại thường xuyên. Về thu nhập, đa số thuộc tập trung ở mức 5 - 10 triệu (32,5%) và dưới 5 triệu (26,3%), cho thấy sự nhạy cảm với chi phí. Về nơi ở hiện tại, người sống trong Vành đai 1 chiếm tỷ lệ cao nhất với 41,8%, trong khi các nhóm từ Vành đai 1 đến Vành đai 2, từ Vành đai 2 đến Vành đai 3 và ngoài Vành đai 3 lần lượt chiếm 20,3%, 20,0% và 18,0%. Điều này cho thấy mẫu khảo sát tập trung nhiều ở khu vực đô thị trung tâm, nơi mật độ giao thông cao và các vấn đề về ùn tắc, ô nhiễm có thể làm gia tăng sự quan tâm đến phương tiện giao thông xanh như xe máy điện.

Người được khảo sát có tần suất di chuyển khá cao, chủ yếu từ 2 - 4 chuyến/ngày, phản ánh nhu cầu đi lại thường xuyên trong đô thị. Xe máy xăng vẫn là phương tiện phổ biến nhất (61,8%), trong khi giao thông công cộng còn hạn chế (5,5%), cho thấy sự phụ thuộc lớn vào phương tiện cá nhân nhưng cũng mở ra khả năng chuyển đổi sang xe máy điện. Mục đích di chuyển chủ yếu là đi học/đi làm (70%), mang tính lặp lại hàng ngày. Về quãng đường và thời gian, hơn 70% chuyến đi dưới 7 km và phần lớn dưới 30 phút, rất phù hợp với đặc điểm vận hành của xe máy điện. Đồng thời, tỷ lệ chi tiêu cho đi lại chủ yếu ở mức 2 - 6% thu nhập, cho thấy người dân nhạy cảm với chi phí, từ đó nhấn mạnh lợi thế tiết kiệm của xe máy điện trong lựa chọn phương tiện.

Bảng 1. Thống kê đặc điểm hành vi đi lại của người trả lời (N = 400)

Nhóm tiêu chí	Tiêu chí	Số lượng	Tỷ lệ (%)
Số chuyến đi bình quân/ngày	2 chuyến	152	38,0
	3 chuyến	98	24,5
	4 chuyến	96	24,0
	Trên 4 chuyến	54	13,5
Phương tiện thường dùng nhất	Xe buýt/BRT/đường sắt đô thị	22	5,5
	Ô tô cá nhân	47	11,8
	Xe máy xăng	247	61,8
	Taxi/xe công nghệ	40	10,0
	Xe đạp/đi bộ	33	8,3
	Khác	11	2,8
Mục đích chuyến đi thường xuyên	Đi học/đi làm	280	70,0
	Mua sắm/việc nhà	40	10,0
	Giải trí/thăm thân	38	9,5
	Y tế	29	7,2
	Khác	13	3,3
Quãng đường chuyến đi thường xuyên	Dưới 3 km	153	38,3
	Từ 3 km đến dưới 7 km	130	32,5
	Từ 7 km đến dưới 15 km	62	15,5
	Từ 15 km trở lên	55	13,8
Thời gian di chuyển bình quân	Dưới 15 phút	150	37,5
	Từ 15 đến dưới 30 phút	128	32,0
	Từ 30 đến dưới 45 phút	70	17,5
	Từ 45 phút trở lên	52	13,0
Tỷ lệ thu nhập dành cho đi lại/tháng	Dưới 2%	46	11,5
	Từ 2% đến dưới 4%	144	36,0
	Từ 4% đến dưới 6%	111	27,8
	Từ 6% đến dưới 8%	58	14,5
	Từ 8% đến dưới 10%	41	10,3

4.2. Kiểm định độ tin cậy của thang đo

Bảng 2. Danh mục biến nghiên cứu và mã hóa

STT	Mã	Nội dung
1	PU	Lợi ích của xe máy điện
2	PU_1	Sử dụng xe máy điện góp phần bảo vệ môi trường và sức khỏe cộng đồng
3	PU_2	Xe máy điện đáp ứng tốt nhu cầu đi lại hằng ngày của tôi
4	PU_3	Sử dụng xe máy điện giúp giảm chi phí đi lại hàng tháng của tôi
5	PU_4	Sử dụng xe máy điện giúp tôi tiết kiệm chi phí bảo trì, sửa chữa hơn
6	*PR*	*Rủi ro và hạn chế khi sử dụng xe máy điện*
7	PR_1	Tôi lo ngại về quãng đường di chuyển tối đa của xe máy điện
8	PR_2	Tôi lo ngại về việc sạc điện cho xe máy điện hiện nay còn bất tiện
9	PR_3	Tôi lo ngại về độ bền và tuổi thọ của pin xe máy điện

STT	Mã	Nội dung
10	PR_4	Tôi lo ngại về chi phí thay thế pin khi sử dụng xe máy điện
11	PR_5	Tôi lo ngại về sự ổn định và khả năng kiểm soát xe máy điện khi di chuyển
12	PR_6	Tôi lo ngại về độ an toàn của xe máy điện khi di chuyển trong điều kiện giao thông đô thị
13	*Att*	*Thái độ về việc sử dụng xe máy điện*
14	Att_1	Tôi có thiện cảm với việc sử dụng xe máy điện
15	Att_2	Tôi cho rằng sử dụng xe máy điện là lựa chọn phù hợp trong đô thị
16	Att_3	Tôi cảm thấy yên tâm khi cân nhắc sử dụng xe máy điện
17	*PBC*	Yếu tố Kinh tế - Tài chính
18	PBC_1	Giá mua xe máy điện là rào cản đối với tôi
19	PBC_2	Chi phí vận hành thấp là lợi thế của xe máy điện
20	PBC_3	Thu nhập hiện tại ảnh hưởng đến khả năng mua xe máy điện
21	*SN*	*Yếu tố Xã hội - Cộng đồng*
22	SN_1	Gia đình khuyến khích tôi chuyển sang sử dụng xe máy điện
23	SN_2	Bạn bè sẽ ủng hộ nếu tôi quyết định chuyển sang sử dụng xe máy điện
24	SN_3	Việc nhiều người xung quanh tôi sử dụng xe máy điện sẽ ảnh hưởng đến quyết định của tôi
25	*EC*	*Yếu tố môi trường và chính sách*
26	EC_1	Tôi lo lắng về vấn đề ô nhiễm không khí tại Hà Nội
27	EC_2	Tôi biết về các chính sách của Chính phủ nhằm khuyến khích chuyển đổi phương tiện xanh để bảo vệ môi trường
28	EC_3	Tôi sẵn sàng thay đổi phương tiện vì mục tiêu bảo vệ môi trường
29	*Int*	*Ý định lựa chọn xe máy điện*
30	Int_1	Tôi có ý định mua xe máy điện trong 1 - 2 năm tới
31	Int_2	Tôi sẵn sàng thay thế xe máy xăng bằng xe máy điện
32	Int_3	Nếu xe máy xăng bị hạn chế lưu thông, tôi sẽ lựa chọn xe máy điện

Kết quả kiểm định tại Bảng 3 cho thấy hầu hết các thang đo đều đạt yêu cầu về độ tin cậy. Cụ thể, thang đo Lợi ích của xe máy điện có Cronbach's Alpha đạt 0,772; thang đo Thái độ về việc sử dụng xe máy điện đạt 0,831; thang đo Yếu tố Kinh tế - Tài chính đạt 0,746; thang đo Yếu tố Xã hội - Cộng đồng đạt 0,759; thang đo Yếu tố môi trường và chính sách đạt 0,845 và thang đo Hành vi/Ý định lựa chọn xe máy điện đạt 0,766. Các biến quan sát trong các thang đo này đều có hệ số tương quan biến - tổng đạt yêu cầu và được giữ lại cho các bước phân tích tiếp theo.

Riêng thang đo Rủi ro và hạn chế khi sử dụng xe máy điện có Cronbach's Alpha đạt 0,800. Tuy nhiên, biến quan sát PR4 có hệ số tương quan biến - tổng thấp (0,259) và khi loại biến này thì Cronbach's Alpha của thang đo tăng lên 0,870. Do đó, biến PR4 được loại khỏi mô hình nghiên cứu nhằm nâng cao độ tin cậy của thang đo.

Bảng 3. Bảng hệ số Cronbach's Alpha của các biến độc lập và phụ thuộc

Biến quan sát	Trung bình thang đo nếu loại biến	Phương sai thang đo nếu loại biến	Tương quan biến - tổng	Cronbach's Alpha nếu biến này bị loại
Lợi ích của xe máy điện (PU): Cronbach's alpha = 0,772				
PU1	12,94	3,638	,703	,653
PU2	12,99	3,604	,566	,724
PU3	13,33	3,927	,530	,740
PU4	12,96	3,991	,511	,749
Rủi ro và hạn chế khi sử dụng xe máy điện (PR): Cronbach's alpha = 0,800				
PR1	10,59	13,861	,687	,743
PR2	10,67	14,769	,675	,754
PR3	10,53	13,804	,589	,761
PR4	9,61	14,509	,259	,870
PR5	10,63	13,647	,751	,731
PR6	10,41	13,404	,628	,752
Thái độ về việc sử dụng xe máy điện (Att): Cronbach's alpha = 0,831				
ATT1	7,22	2,797	,710	,750
ATT2	8,01	3,343	,669	,788
ATT3	7,46	3,181	,700	,758
Yếu tố Kinh tế - Tài chính (PBC): Cronbach's alpha = 0,746				
PBC1	7,70	2,999	,481	,761
PBC2	7,80	2,688	,615	,617
PBC3	7,77	2,246	,638	,584
Yếu tố Xã hội - Cộng đồng (SN): Cronbach's alpha = 0,759				
SN1	8,02	2,340	,478	,802
SN2	8,35	1,907	,676	,570

Biến quan sát	Trung bình thang đo nếu loại biến	Phương sai thang đo nếu loại biến	Tương quan biến - tổng	Cronbach's Alpha nếu biến này bị loại
SN3	8,24	2,302	,631	,639
Yếu tố môi trường và chính sách (EC): Cronbach's alpha = 0,845				
EC1	8,02	2,438	,722	,778
EC2	7,99	2,524	,755	,740
EC3	8,14	3,039	,671	,825
Ý định lựa chọn xe máy điện (Int): Cronbach's alpha = 0.766				
INT1	7,77	1,908	,670	,607
INT2	7,75	2,122	,658	,640
INT3	7,90	1,819	,506	,821

4.3. Phân tích nhân tố khám phá

4.3.1. Đối với biến độc lập

Sau khi kiểm định độ tin cậy bằng Cronbach's Alpha, 21 biến quan sát thuộc 6 thang đo được đưa vào phân tích nhân tố khám phá EFA. Kết quả cho thấy chỉ số KMO đạt 0,779, chứng tỏ dữ liệu phù hợp để phân tích nhân tố. Kiểm định Bartlett's Test có Sig. = 0,000 < 0,05, cho thấy các biến quan sát có tương quan với nhau và đủ điều kiện thực hiện EFA.

Kết quả EFA rút trích được 6 nhân tố tại điểm dừng Eigenvalue = 1,402 > 1. Tổng phương sai trích lũy kế đạt 70,165%, lớn hơn 50%, cho thấy 6 nhân tố này giải thích được phần lớn sự biến thiên của dữ liệu. Đồng thời, hệ số tải nhân tố của 21 biến quan sát đều lớn hơn 0,5, chứng tỏ các biến có giá trị hội tụ tốt. Cụ thể, nhóm PR gồm 5 biến quan sát có hệ số tải từ 0,723 đến 0,866, trong đó PR5 có hệ số tải cao nhất, cho thấy nhóm biến này phản ánh tốt nhân tố PR. Nhóm ATT gồm 3 biến có hệ số tải từ 0,782 đến 0,861, thể hiện mức độ hội tụ cao. Nhóm PU gồm 4 biến có hệ số tải từ 0,698 đến 0,859; mặc dù PU3 có hệ số thấp nhất nhưng vẫn vượt ngưỡng chấp nhận. Nhóm EC gồm 3 biến có hệ số tải khá đồng đều, từ 0,822 đến 0,844, cho thấy sự ổn định trong thang đo. Nhóm PBC gồm 3 biến có hệ số tải từ 0,650 đến 0,865, trong đó PBC1 thấp hơn các biến còn lại nhưng vẫn đạt yêu cầu. Nhóm SN gồm 3 biến có hệ số tải từ 0,743 đến 0,858, phản ánh tốt nhân tố SN.

4.3.2. Đối với biến phụ thuộc

Kết quả phân tích nhân tố khám phá (EFA) đối với biến phụ thuộc - Ý định lựa chọn xe máy điện cho thấy dữ liệu phù hợp để phân tích khi chỉ số KMO đạt 0,658 và kiểm định Bartlett's Test có Sig. = 0,000 < 0,05. Phân tích EFA trích được 1 nhân tố duy nhất tại điểm dừng Eigenvalue = 2,097 > 1, với tổng phương sai trích đạt 69,896%, vượt ngưỡng 50%. Các biến quan sát INT1, INT2 và INT3 đều có hệ số tải nhân tố lớn hơn 0,7, cho thấy mức độ hội tụ cao và phản ánh tốt khái niệm hành vi/ý định lựa chọn xe máy điện. Do đó, toàn bộ các biến quan sát của thang đo biến phụ thuộc được giữ lại và sử dụng cho các bước phân tích tiếp theo.

Bảng 4. Kết quả phân tích EFA đối với biến phụ thuộc

Biến quan sát	Hệ số tải
INT1	,883
INT2	,872
INT3	,746
Eigenvalue	2,097
Phương sai trích %	69,896
KMO	*0,658*
Sig.	*0,000*

4.4. Kiểm định mô hình và giả thuyết

4.4.1. Phân tích hệ số tương quan Pearson

Bảng 5. Phân tích tương quan Pearson

Correlations								
		PU	**PR**	**ATT**	**PBC**	**SN**	**EC**	**INT**
INT	Pearson Correlation	,386**	-,460**	,444**	,440**	,332**	,618**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	400	400	400	400	400	400	400

Kết quả phân tích tương quan Pearson cho thấy tất cả các biến độc lập đều có mối liên hệ tuyến tính với ý định lựa chọn xe máy điện (INT) và đều có ý nghĩa thống kê ở mức 1%. Trong đó, yếu tố môi trường và chính sách (EC) có tương quan dương mạnh nhất (r = 0,618). Các yếu tố Thái độ (ATT), Kinh tế - Tài chính (PBC) và Lợi ích (PU) có tương quan dương mức trung bình, cho thấy đều ảnh hưởng đáng kể đến ý định. Ngược lại, Rủi ro và hạn chế (PR) có tương quan âm (r = -0,460), tức là nhận thức rủi ro càng cao thì ý định càng giảm. Yếu tố xã hội (SN) cũng có tương quan dương nhưng ở mức thấp hơn.

4.4.2. Phân tích hồi quy tuyến tính bội

Bảng 6. Kết quả kiểm định sự phù hợp của mô hình và tự tương quan

Mô hình	**R**	**R bình phương**	**R bình phương hiệu chỉnh**	**Sai số ước lượng chuẩn**	**Durbin-Watson**
1	,771[a]	,595	,589	,42435	2,390

Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính bội cho thấy mô hình nghiên cứu có mức độ phù hợp khá cao. Cụ thể, hệ số tương quan R đạt 0,771 cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa các biến độc lập và biến phụ thuộc. Hệ số R bình phương bằng 0,595 và R bình phương hiệu chỉnh là 0,589, chứng tỏ khoảng 58,9% sự biến thiên của biến phụ thuộc được giải thích bởi các biến độc lập trong mô hình, phần còn lại chịu ảnh hưởng của các yếu tố khác ngoài mô hình. Sai số ước lượng chuẩn đạt 0,42435, cho thấy mức độ sai lệch giữa giá trị dự đoán và giá trị thực tế ở mức chấp nhận được. Bên cạnh đó, chỉ số Durbin-Watson bằng 2,390 nằm trong khoảng cho phép, khẳng định mô hình không xảy ra hiện tượng tự tương quan của phần dư, do đó các giả định của mô hình hồi quy được đảm bảo.

Kiểm định F trong phân tích phương sai ANOVA với giá trị Sig. là 0,000, dưới ngưỡng 0,05, chứng tỏ rằng mô hình hồi quy tuyến tính đã xây dựng phù hợp với tổng thể.

Bảng 7. Các thông số của mô hình hồi quy

Coefficients[a]								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF	
1	(Constant)	,766	,233		3,280	,001		
	PU	,145	,036	,137	3,997	,000	,873	1,146
	PR	-,200	,030	-,230	-6,609	,000	,849	1,178
	ATT	,146	,028	,187	5,195	,000	,793	1,261
	PBC	,177	,030	,205	5,955	,000	,872	1,147
	SN	,095	,033	,100	2,889	,004	,853	1,172
	EC	,313	,031	,372	10,156	,000	,770	1,299
a. Dependent Variable: INT								

Xét chi tiết các hệ số hồi quy trong Bảng 7, tất cả các biến độc lập đều có ý nghĩa thống kê (Sig. < 0,05) và tác động trực tiếp đến ý định (INT). Trong đó, EC (Beta = 0,372) là yếu tố có tác động mạnh nhất và cùng chiều, cho thấy khi nhận thức về yếu tố EC tăng thì ý định của đối tượng nghiên cứu cũng gia tăng đáng kể. Tiếp theo là PR với hệ số Beta = -0,230, cho thấy tác động ngược chiều, hàm ý rằng khi rủi ro cảm nhận tăng sẽ làm giảm ý định. Các biến PBC (Beta = 0,205) và ATT (Beta = 0,187) cũng có ảnh hưởng tích cực và tương đối mạnh, phản ánh vai trò quan trọng của nhận thức kiểm soát hành vi và thái độ đối với ý định. Biến PU (Beta = 0,137) và SN (Beta = 0,100) tuy có mức tác động thấp hơn nhưng vẫn mang ý nghĩa thống kê, cho thấy chúng vẫn góp phần giải thích hành vi của đối tượng nghiên cứu.

Ngoài ra, các chỉ số Tolerance đều lớn hơn 0,7 và VIF dao động từ 1,146 đến 1,299, thấp hơn nhiều so với ngưỡng 10, chứng tỏ không xảy ra hiện tượng đa cộng tuyến giữa các biến độc lập. Nhìn chung, kết quả hồi quy khẳng định mô hình nghiên cứu là đáng tin cậy, các giả thuyết nghiên cứu đều được ủng hộ, đồng thời làm cơ sở quan trọng cho việc đề xuất các hàm ý quản trị ở các phần tiếp theo.

Mô hình hồi quy không vi phạm các giả thuyết và do đó mô hình này có ý nghĩa thống kê. Có 6 biến được xác định ảnh hưởng đáng kể đến biến phụ thuộc, 6 giả thuyết được chấp nhận xuất hiện trong mô hình. Mô hình hồi quy thể hiện sự ảnh hưởng của 6 biến độc lập lên biến phụ thuộc, có dạng như sau:

INT= 0,137*PU – 0,230*PR + 0,187*ATT + 0,205*PBC + 0,100*SN + 0,372*EC

5. MỨC ĐỘ TÁC ĐỘNG CỦA CÁC YẾU TỐ ĐẾN HÀNH VI LỰA CHỌN XE MÁY ĐIỆN

Kết quả hồi quy cho thấy mô hình nghiên cứu có mức độ phù hợp cao, với R^2 hiệu chỉnh đạt 0,589, nghĩa là 58,9% sự biến thiên của hành vi/ý định lựa chọn xe máy điện được giải thích bởi các yếu tố trong mô hình. Giá trị kiểm định F có Sig. = 0,000 chứng tỏ mô hình là phù hợp về mặt thống kê. Bên cạnh đó, các chỉ số Durbin-Watson xấp xỉ 2 và hệ số VIF đều nhỏ hơn 2 cho thấy mô hình không xảy ra hiện tượng tự tương quan và đa cộng tuyến.

Kết quả cho thấy cả 6 yếu tố đều có ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến hành vi lựa chọn xe máy điện, mức độ tác động được sắp xếp theo thứ tự giảm dần như sau: Yếu tố môi trường và chính sách (EC) - *tác động mạnh nhất*; Rủi ro cảm nhận (PR) - rào cản lớn nhất; khả năng kiểm soát hành vi cảm nhận (PBC; Thái độ (ATT); Lợi ích cảm nhận (PU); Chuẩn mực xã hội (SN).

6. KHUYẾN NGHỊ

Trên cơ sở kết quả phân tích, để thúc đẩy hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân TP Hà Nội, cần triển khai đồng bộ các nhóm giải pháp gắn với các yếu tố ảnh hưởng đã được kiểm định trong mô hình: (1) Hoàn thiện hệ thống chính sách, tăng cường hỗ trợ từ Nhà nước thông qua các biện pháp như trợ giá khi mua xe máy điện, miễn giảm các loại thuế, phí liên quan, đẩy mạnh phát triển hạ tầng trạm sạc; (2) Cần giảm thiểu rủi ro cảm nhận của người sử dụng bằng cách nâng cao chất lượng sản phẩm, cải thiện công nghệ pin, tăng quãng đường di chuyển, xây dựng hệ thống bảo dưỡng, minh bạch; (3) Tăng khả năng tiếp cận tài chính cho người dân, đẩy mạnh truyền thông nhằm nâng cao nhận thức và thái độ tích cực của người dân, nhấn mạnh các lợi ích về kinh tế, môi trường và sự tiện lợi; (4) Tận dụng ảnh hưởng của yếu tố xã hội, khuyến khích sử dụng xe máy điện, từ đó tạo hiệu ứng lan tỏa và hình thành chuẩn mực tiêu dùng mới; (5) Phát triển hệ sinh thái giao thông xanh đồng bộ, kết hợp giữa xe máy điện với hệ thống giao thông công cộng, nhằm nâng cao tính thuận tiện và khả năng thay thế.

7. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xác định các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn xe máy điện của người dân TP Hà Nội thông qua mô hình tích hợp các yếu tố kinh tế, tâm lý - nhận thức, xã hội và môi trường - chính sách. Kết quả cho thấy tất cả các yếu tố đều có tác động có ý nghĩa thống kê, trong đó yếu tố môi trường và chính sách có ảnh hưởng mạnh nhất, trong khi rủi ro cảm nhận là rào cản lớn đối với ý định sử dụng. Đồng thời, các yếu tố như khả năng tài chính, thái độ và nhận thức về lợi ích cũng đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy hành vi chuyển đổi phương tiện, Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất 5 nhóm giải pháp chính. Việc triển khai đồng bộ các giải pháp này sẽ góp phần thúc đẩy quá trình chuyển đổi từ xe máy xăng sang xe máy điện.

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-KT-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thủ tướng Chính phủ. Chỉ thị số 20/CT-TTg về một số nhiệm vụ cấp bách, quyết liệt ngăn chặn, giải quyết tình trạng ô nhiễm môi trường, 2025.

[2] Trường Đại học Giao thông vận tải. Nghiên cứu thực trạng và các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi sử dụng phương tiện giao thông cá nhân tại Hà Nội. Báo cáo nghiên cứu, Trường Đại học GTVT, 2020.

[3] Từ Sỹ Sùa. Vận tải hành khách đô thị. NXB. Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, 2017.

[4] Haustein S, Jensen A.F. Factors of electric vehicle adoption: A comparison of conventional and electric vehicle users. Transportation Research Part A., 2018, 113:213-225. Internet: https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.04.002.

[5] Hair J.F, Black W.C, Babin B.J, Anderson R.E. Multivariate Data Analysis, 7th ed. Pearson Education, 2010.

[6] Kim J, Park Y. Electric vehicle adoption and usage behavior. Energy Policy, 129:325-333, 2019. Internet: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.031.

[7] Li W., Long R., Chen H., Chen F. Willingness to purchase electric vehicles in China: A policy perspective. Journal of Cleaner Production, 282:124533, 2021. Internet: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124533.

[8] Wang N., Tang L., Pan H. Electric vehicle acceptance in urban China, Energy Policy., 140:111403, 2020. Internet: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111403.

■Ngày nhận bài: 10/3/2026 ■Ngày sửa bài: 16/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Nghiên cứu tính toán ổn định ray hàn liền và ứng dụng trên đoạn đường sắt Hà Nội - TP Hồ Chí Minh

The stability analysis of continuous welded rail (CWR) and its application on the Hanoi - Ho Chi Minh City railway line

> TS TRƯƠNG TRỌNG VƯƠNG[1,*], KS ĐỖ HỒNG SƠN[2], THS NGUYỄN XUÂN PHÚ[3], KS NGUYỄN HUY CÔNG[4]

[1]Trường Cao đẳng Đường sắt
[2]Tổng công ty Đường sắt Việt Nam
[3]Công ty Cổ phần Đường sắt Quảng Nam - Đà Nẵng
[4]Công ty Cổ phần Đường sắt Hà Thái
[*]Email: truongtrongvuong2023@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nghiên cứu lý luận ổn định ray hàn liền và các điều kiện kỹ thuật thực tế của đoạn đường sắt đang khai thác, tuyến đường sắt Hà Nội - TP.HCM. Từ các điều kiện và tham số thực tế, tác giả sử dụng các nguyên lý tính toán ổn định về ray hàn liền và cho được kết quả: Đối với đường cong có bán kính đường cong R< 200 m thì sử dụng các thanh ray tiêu chuẩn; đối với đường cong có bán kính đường cong 200 m ≤R <400 m thì có thể sử dụng ray dài từ 100 m đến 150 m; đối với đường cong có bán kính đường cong 400 m ≤R <600 m thì có thể sử dụng ray hàn liền với loại hình ray từ P50 trở lên; đối với đường cong có bán kính R> 600 m thì kết quả tính toán cho thấy có thể sử dụng ray hàn liền với ray P43 hoặc ray P50.

Từ khóa: Ray hàn liền; thanh ray tiêu chuẩn; điều kiện kỹ thuật; tính toán ổn định.

ABSTRACT

This paper focuses on the theory of continuous welded rail (CWR) stability and the practical technical conditions of the Hanoi - Ho Chi Minh City line currently in operation. Based on actual conditdsfions and parameters, the authors apply the principles of stability analysis for CWR to obtain the following results: for curves with a radius R < 200 m, standard-length rails should be used; for curves with a radius 200 m ≤ R < 400 m, rails with lengths from 100 m to 150 m can be utilized; for curves with a radius 400 m ≤ R < 600 m, CWR is applicable using P50 rail sections or higher; for curves with a radius R > 600 m, the calculation results indicate that CWR with P43 or P50 rail types are suitable.

Keywords: Continuous welded rail (CWR); standard-length rails; technical conditions; stability analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đường sắt không khe nối (ĐSKKN) (ray hàn liền) là hàn những thanh ray tiêu chuẩn thành ray dài có chiều dài > 300 m trở lên gọi là ĐSKKN. Trên tuyến đường sắt thông thường, mối nối ray là một khâu yếu của đường ray, do tồn tại mối nối, khi đoàn tàu đi qua phát sinh xung kích và chấn động, đồng thời kéo theo tiếng ồn, lực va chạm lớn thường gấp ba lần so với những vị trí không có mối nối. Lực xung kích tại mối nối ảnh hưởng chạy tàu ổn định và hành khách không được thoải mái, làm phá hoại lớp đá, giảm tuổi thọ sử dụng ray và phụ kiện liên kết, tăng chi phí lao động sửa chữa, bảo trì. Chi phí bảo dưỡng đoạn tuyến có mối nối chiếm trên 35% tổng chi phí bảo dưỡng; số lượng thay ray hư hỏng ở mối nối so với chỗ khác tăng 2 - 3 lần; ray thương tật nặng 60% số phát sinh tại mối nối. Sự phát triển không ngừng của tải trọng trục đoàn tàu, mật độ và tốc độ chạy tàu, các khuyết điểm trên càng bộc lộ rõ rệt, không thể đáp ứng nhu cầu vận tải.

Để cải thiện trạng thái làm việc của mối nối ray, từ những năm

1930, con người không ngừng nghiên cứu và sử dụng các phương pháp hàn ray tạo thành ĐSKKN. Đầu tiên là gặp phải vấn đề chất lượng hàn mối nối; tiếp theo là vấn đề cường độ và ổn định của ray dài dưới tác dụng đồng thời của động lực đoàn tàu và lực nhiệt độ; vấn đề nữa là thiết kế ĐSKKN, vận chuyển cấu kiện ray dài, thi công đặt ray, duy tu bảo dưỡng và hàng loạt vấn đề kỹ thuật, lý thuyết. Từng bước, các vấn đề trên được giải quyết, ĐSKKN được sử dụng rộng rãi ở đường sắt các nước thế giới. ĐSKKN thể hiện hàng loạt ưu điểm do giảm đáng kể mối nối, chạy tàu ổn định, hành khách dễ chịu, đồng thời chi phí duy tu, sửa chữa đường ray và đầu máy toa xe giảm, tuổi thọ kéo dài. Tư liệu cho biết, về tiết kiệm lao động và kéo dài tuổi thọ thiết bị thì ĐSKKN so với đường sắt mối nối có thể tiết kiệm chi phí duy tu 30 - 70%.

2. NGUYÊN LÝ TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH RAY HÀN LIỀN

Việc nghiên cứu phân tích sự ổn định của ĐSKKN có ý nghĩa lý luận và thực tiễn rất quan trọng. Mục đích chủ yếu của việc phân tích về ổn định ĐSKKN là nghiên cứu quy luật phát sinh hiện tượng bung đường, tức là hiện tượng "bung ray, phá đường", phân tích các điều kiện cơ học của việc phát sinh hiện tượng này cũng như tác dụng của các nhân tố ảnh hưởng chủ yếu, nhằm tìm ra quan hệ định lượng cần thiết giữa các nhân tố ảnh hưởng để có được những biện pháp tương ứng trong các khâu thiết kế, thi công và bảo dưỡng, khống chế chắc chắn được các nhân tố liên quan đến việc giữ gìn sự ổn định của đường, từ đó bảo đảm ĐSKKN được ổn định và chạy tàu an toàn. Phân tích tính ổn định của ĐSKKN là để xác định tiêu chuẩn tăng nhiệt độ cho phép, điều kiện về nhiệt độ ray trong các tác nghiệp duy tu đường và đưa ra các căn cứ lý luận cho các quy định kỹ thuật liên quan.

Cơ sở lý luận của vấn đề ĐSKKN là lý thuyết đàn hồi và nguyên lý năng lượng biến phân. Công thức tính ĐSKKN thể hiện quan niệm: Để tránh hoặc tận lượng giảm thiểu mức tích lũy biến dạng dư trong quá trình biến đổi lặp của nhiệt độ, cần phải hạn chế trị biên độ biến dạng f, đồng thời cũng đưa ra nhận định về vi phạm đàn hồi của nền đá là 1 - 2 mm và muốn tránh phải hạn chế nhiều quá về lực nhiệt độ ảnh hưởng tới phạm vi địa lý đặt ĐSKKN đã định nghĩa khi f = 2 mm lực nhiệt độ tính được sẽ là lực nhiệt độ tính toán P_N.

Lấy lực nhiệt độ tính toán chia cho một hệ số an toàn xác định K sẽ có lực nhiệt độ cho phép. Do cách tính này thuộc loại dịch chuyển nhỏ, nên không xét đến lực nhiệt độ nén giảm thấp mà chỉ xét mức nhiệt độ tăng cho phép $[\Delta t] = \frac{[P]}{E\ \alpha}$

Có nhiều phương pháp tính toán khác nhau, trong nội dung bài báo, tác giả giới thiệu hai phương pháp tính: Phương pháp đường tên đã định và phương pháp độ cong đã định.

Đường tên đã định:

f_{oe} và f_{op} đã biết, vận dụng nguyên lý về biến phân ta có:

$$P = \frac{\beta EJ\frac{\pi^2}{l^2}(f + f_{oe}) + \frac{4}{\pi^3}Q\ell^2}{f + f_{oe} + \frac{32}{\pi^3}f_{op} + \frac{4l^2}{\pi^3 R}}$$

do $\frac{dP}{d\ell} = 0$ có:

$$P = \frac{1}{Q}\left[B_2 + \sqrt{B_2^2 + \frac{\pi^5}{4}\beta EJ(f + f_{oe})Q}\right]$$

Trong đó:

$$B_2 = \frac{\beta EJ\pi^2(f + f_{oe})}{R\left(f + f_{oe} + \frac{32}{\pi^3}f_{op}\right)}$$

Độ cong đã định:

Giả thiết độ cong của biến dạng cong đàn tích và dẻo đã biết, từ nguyên lý ta có:

$$P = \frac{\beta EJ\frac{\pi^2}{\ell^2}(f + f_{oe}) + \frac{4}{\pi^3}Q\ell^2}{f + f_{oe} + \frac{4\ell}{\pi^3 R'}}$$

Do $\frac{dP}{d\ell} = 0$, có:

$$l^2 = \frac{1}{Q}\left[B_1 + \sqrt{B_1^2 + \frac{\pi^3}{4}(f + f_{oe})B_1 R'Q}\right] \quad (2\text{-}49)$$

Trong đó:

$$B_1 = \frac{\beta EJ\pi^2}{R'}$$

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

Từ nguyên lý tính toán nêu trên, trên cơ sở số liệu kết cấu hạ tầng đường sắt đoạn từ km 12+000 đến km 137+300 tuyến đường sắt Hà Nội - TP.HCM, nhóm tác giả đã lập bảng tính với các số liệu ray P50 (50 kg/m), tà vẹt bê tông dự ứng lực kiểu TN1 1.600 thanh/km, phụ kiện liên kết ray và tà vẹt là phụ kiện đàn hồi kiểu ω, lập lách 6 lỗ, chiều dày nền đá dưới đáy tà vẹt 30 cm, chiều rộng vai đá 40 cm. Tác giả đã tính toán ứng với các đường cong >2.000 m, đến các đường cong lần lượt là 1.000 m, 800 m, 600 m, 500 m, 400 m, 300 m, 200 m, kết quả như Bảng 1. Từ công thức tính nhiệt độ cho đoạn ray dài, ta sẽ tìm được trị số lực tương ứng với chiều dài ray dài từ 50 m đến 150 m như Bảng 2.

Bảng 1. Kết quả tính toán ứng với các bán kính đường cong khác nhau, cho kết quả nhiệt độ cho phép

Loại hình ray	Nhiệt độ Δt_K / Nhiệt độ cho phép $[\Delta t_c]$ / Hệ số an toàn Ko	Bán kính đường cong R≥2000m	Bán kính đường cong/m						
			1000	800	600	500	400	300	200
43	Δt_K/°C	90	80	80	75	70	62	55	48
	$[\Delta t_c]$/°C	47	45	44	42	37	31	26	21
	K_0	1,91	1,75	1,79	1,75	1,87	1,94	2,1	2,2
50	Δt_K/°C	95	84	84	76	73	65	60	52
	Δt_K/°C	50	48	47	44	39	34	28	23
	K_0	1,90	1,75	1,79	1,75	1,87	1,94	2,1	2,2

Bảng 2. Trị số lực nhiệt và khe hở mối nối ray, ứng với chiều dài ray dài khác nhau

$P_t = P_H + r.L/2$

Đối với ray P50

Chiều dài ray L(m)	50	75	100	125	150
P_t (KN)	390,00	440,00	490,00	540,00	590,00

Đối với ray P43

Chiều dài ray L(m)	50	75	100	125	150
P_t (KN)	340,00	390,00	440,00	490,00	540,00

Từ Bảng 1 cho ta thấy rằng, khi bán kính đường cong nhỏ hơn hoặc bằng 400 m thì độ biến thiên nhiệt đối với ray P50 là 34°C; đối với ray P43 là 31°C. Như vậy, độ biến thiên nhiệt độ theo tính toán ở khí hậu VN là 30 - 32°C; điều đó chứng tỏ rằng bán kính đường cong nhỏ hơn hoặc bằng 400 m thì rất khó thực hiện ĐSKKN, lúc đó cần

tính toán để sử dụng ray hàn dài 100 m, 150 m.

Khi bán kính đường cong nhỏ hơn hoặc bằng 200 m thì sử dụng thanh ray tiêu chuẩn, không nên sử dụng ray hàn dài hoặc ĐSKKN.

Từ công thức tính nhiệt độ cho đoạn ray dài ta sẽ tìm được trị số lực tương ứng và khe hở mối nối ray, để bố trí lập lách cho phù hợp.

4. KẾT LUẬN

Căn cứ kết quả tính toán với số liệu thực trạng của kết cấu hạ tầng đường sắt đang khai thác, cho ta được kết quả:

- Đối với đường cong có bán kính đường cong R< 200 m thì sử dụng các thanh ray tiêu chuẩn, không sử dụng ray dài hoặc ray hàn liền.

- Đối với các đoạn đường cong có bán kính đường cong 200 m ≤R <400 m, thì theo tính toán phân tích tính ổn định của đường ray thì có thể sử dụng ray dài từ 100 m đến 150 m.

- Đối với các đoạn đường cong có bán kính đường cong 400 m ≤R <600 m lớn thì sau khi giả định tăng lực cản của nền đá ballast, tăng lực xiết của phụ kiện thì tính ổn định của đường ray khi hàn liền được đảm bảo, thì có thể sử dụng ray hàn liền từ 50 kg/m trở lên.

- Đối với đường cong có bán kính R> 600 m, kết quả tính toán cho thấy có thể sử dụng ray ĐSKKN với ray P43 hoặc ray P50.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] PGS.TS Nguyễn Thanh Tùng, TS Trương Trọng Vương, ThS Chu Quang Chiến. Kết cấu tầng trên ĐSKKN. NXB. Giao thông vận tải, 2019.

[2] PGS.TS Nguyễn Thanh Tùng. Kết cấu tầng trên đường sắt. NXB. Giao thông vận tải, 2009.

[3] PGS.TS Phạm Văn Ký. Phân tích kết cấu đường sắt. NXB. Giao thông vận tải.

[4] Quy trình bảo trì kết cấu hạ tầng đường sắt quốc gia ban hành theo văn bản số 281/QĐ-CĐSVN ngày 30/6/2025 của Cục đường sắt Việt Nam.

[5] TCVN 13965-1:2024 - Ứng dụng đường sắt-Hàn ray-Phần 1: Hàn nhiệt nhôm.

[6] Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 03:2014/VNRA - Tiêu chuẩn bảo trì công trình đường sắt không mối nối.

[7] TCVN 11793:2017, Đường sắt đô thị - Khổ đường 1.000 mm - Yêu cầu thiết kế tuyến.

[8] QCVN 08:2018/BGTVT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khai thác đường sắt.

[9] Các tiêu chuẩn, quy trình kỹ thuật ngành Đường sắt Việt Nam liên quan đến thiết kế, thi công, bảo trì đường sắt.

[10] Các sách, giáo trình về đường sắt, kết cấu công trình đường sắt.

[11] Các bài báo khoa học, công trình nghiên cứu về ray hàn liền, đặc biệt là ứng dụng trong điều kiện nhiệt đới.

[12] Tài liệu khảo sát thực tế trên tuyến đường sắt Hà Nội - TP.HCM.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 24/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/4/2026

Smear zone development in soft ground under vacuum consolidation

Sự phát triển vùng ảnh hưởng trong nền đất yếu dưới tác động của cố kết bằng hút chân không

> PHAM HUU HA GIANG[1], NGUYEN NHAT HAO[2], TRAN DUC KHANH[3], LE NGOC TAN[1], HUYNH VAN HIEP[4,*]
[1]Lecturer, College of Engineering - Can Tho University, Campus II
[2]Master student, College of Engineering - Can Tho University, Campus II
[3]Undergraduate student, College of Engineering - Can Tho University, Campus II
[4]Lecturer, College of Engineering and Techonology, Tra Vinh University
*Corresponding Author: Email: hvhiep@tvu.edu.vn

ABSTRACT

This study investigates the deformation propagation in soft ground improved by prefabricated vertical drains (PVDs) combined with vacuum consolidation using finite element modeling. The results show that lateral displacement reaches its maximum at the boundary of the treated zone and decreases rapidly with distance, while vertical displacement is dominated by settlement within the improved area and gradually diminishes outward. The extent of the smear zone is approximately 1.75 times the drain length (1.75L), which can be divided into three regions: strong influence ($x \leq L$), transition ($L < x \leq 1.75L$), and negligible influence ($x > 1.75L$). Increasing vacuum pressure significantly increases deformation magnitude in the near-field region (over 15% when increasing from 70 to 90 kPa), but does not significantly expand the smear zone. The region beyond 1.75L is identified as a safe zone where both lateral and vertical displacements are negligible. These findings provide a scientific basis for evaluating deformation impact and defining safe distances for adjacent structures.

Keywords: Vacuum pressure; PVD; lateral displacement; smear zone; soft soil.

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung phân tích sự lan truyền của biến dạng ngang trong nền đất yếu dưới tác động của xử lý bằng bấc thấm kết hợp hút chân không. Mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng bằng phần mềm PLAXIS 2D với điều kiện địa chất điển hình của khu vực TP.HCM, trong đó nền đất được giả thiết là một lớp sét yếu đồng nhất có chiều dày 22,5 m. Ba kịch bản áp lực hút chân không khác nhau (70 kPa, 80 kPa và 90 kPa) được xem xét trong cùng điều kiện gia tải và thời gian xử lý 180 ngày. Kết quả mô phỏng cho thấy biến dạng ngang của nền đất có xu hướng hội tụ về khu vực xử lý và lan truyền ra vùng xung quanh với biên độ giảm dần theo khoảng cách. Phân tích định lượng thông qua quan hệ giữa chuyển vị ngang và khoảng cách từ mép khu vực xử lý tại độ sâu đặc trưng cho thấy chuyển vị đạt giá trị lớn nhất tại ranh giới khu vực xử lý và suy giảm nhanh theo khoảng cách, tuy nhiên vẫn tồn tại ở các vị trí xa. Đồng thời, khi áp lực hút chân không tăng, không chỉ biên độ chuyển vị ngang tăng lên mà phạm vi lan truyền của biến dạng cũng được mở rộng đáng kể. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế lan truyền biến dạng ngang trong nền đất yếu dưới tác động của hút chân không, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá mức độ ảnh hưởng của phương pháp xử lý này đến khu vực xung quanh.

Từ khóa: Áp lực bơm; bấc thấm; chuyển vị ngang; vùng ảnh hưởng; đất yếu.

1. INTRODUCTION

Ho Chi Minh City and the downstream area of the Saigon-Dong Nai river system are characterized by extensive deposits of soft clay with considerable thickness [1]. In rapidly developing areas such as Thu Thiem and Nha Be, the subsurface profile typically consists of very soft clay layers with thickness ranging from 15 m to over 20 m, located near the ground surface [2], [3]. These soils exhibit unfavorable geotechnical properties, including high natural water content (averaging 84.5%, sometimes exceeding the liquid limit), large void ratio ($e_0 \approx 2.0$), low undrained shear strength, and high compressibility [3]. Under rapid urbanization, infrastructure construction on such soft ground requires effective ground improvement techniques to ensure settlement control and stability [1], [4].

Among available methods, prefabricated vertical drains combined with vacuum consolidation (VCM-PVD) has been widely applied due to its ability to accelerate consolidation and significantly reduce construction time [1], [5]. Unlike conventional surcharge loading, vacuum consolidation induces negative pore pressure, thereby increasing effective stress without significantly

increasing total stress, which helps reduce instability risks [6], [7]. However, a notable feature of this method is the generation of near-isotropic consolidation, leading to lateral soil movement toward the treated zone [3], [7], [8].

This lateral deformation is not confined within the treated area but propagates into the surrounding ground, potentially causing surface cracking and adverse impacts on nearby structures such as embankments, buildings, and infrastructure systems [2], [4], [9]. Field observations in Thu Thiem and Ba Chiem road indicate that the smear zone of vacuum consolidation may extend up to approximately 23 m from the treatment boundary [2], [3]. This highlights the necessity of understanding the spatial distribution and attenuation behavior of lateral displacement.

Despite its practical significance, the extent of deformation propagation and its dependence on vacuum pressure have not been fully quantified. Most previous studies focus primarily on settlement or overall consolidation efficiency, while the spatial distribution of lateral displacement and its variation under different vacuum pressures remain insufficiently addressed.

This study employs a finite element model using PLAXIS 2D to simulate the behavior of soft ground under vacuum consolidation conditions representative of Ho Chi Minh City. The analysis focuses on the propagation of lateral deformation into surrounding soil and evaluates the effect of varying vacuum pressures on both deformation magnitude and influence extent.

2. METHODOLOGY

2.1. Site conditions and soil properties

In this study, the subsoil consists of a soft clay layer with a thickness of approximately 22.5 m, representing typical ground conditions in Ho Chi Minh City. The key geotechnical parameters are summarized in Table 1, including unit weight γ = 1.64 T/m^3, undrained shear strength C = 0.06 MPa, internal friction angle φ = 4°, and initial void ratio e_0 = 2.1. These parameters indicate a very soft soil with low shear strength and high compressibility, which directly governs settlement behavior and lateral deformation under combined surcharge loading and vacuum pressure.

Table 1. Geotechnical parameters of soft soil in the study area

Parameter	Symbol	Unit	Value
Soil layer thickness	h	m	22.5
Unit weight	γ	T/m^3	1.64
Undrained shear strength	C	MPa	0.06
Internal friction angle	φ	°	4
Initial void ratio	e_0	-	2.1

2.2. Finite element method

A finite element approach using PLAXIS 2D was employed to simulate the behavior of soft ground improved by prefabricated vertical drains (PVD) combined with vacuum consolidation. The problem was formulated under plane strain conditions, which is appropriate for linear infrastructure systems. The soil was modeled using the Mohr-Coulomb constitutive model to represent the fundamental elastic-perfectly plastic behavior.

The PVD system was arranged in a triangular pattern with a spacing of 0.9 m and a length of 21 m, approximately equal to the thickness of the soft soil layer, ensuring effective drainage throughout the treated zone (Figure 1). In the two-dimensional model, the drains were simulated using line drain elements, allowing the dissipation of pore water pressure in both vertical and horizontal directions (Figure 2).

The construction process was simulated in sequential stages, including: (i) generation of the initial stress state, (ii) activation of the PVD system, (iii) application of surcharge loading equivalent to a 4.5 m embankment, and (iv) application of vacuum pressure as a uniformly distributed load within the treated zone. Three vacuum pressure levels were considered, namely 70 kPa, 80 kPa, and 90 kPa. The consolidation process was analyzed over a period of 180 days to capture the full development of deformation and pore pressure dissipation.

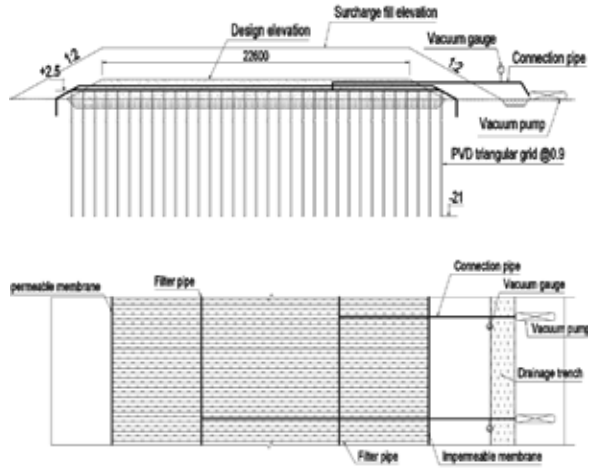


Figure 1. Cross-sectional view and plan layout of PVD arrangement

Figure 2. Modeling in Plaxis 2D

2.3. Smear zone

The smear zone is defined as the spatial extent in which deformation induced by vacuum consolidation remains significant, considering both lateral and vertical components. In this study, the smear zone was evaluated based on the overall displacement field and the relationship between displacement and distance from the treatment boundary.

Displacement fields were first examined using vector plots and contour maps to identify the general trend of deformation propagation. However, due to the nature of finite element analysis, very small displacement values always exist; therefore, the boundary of the smear zone was determined through quantitative analysis based on the attenuation of displacement toward negligible values.

For detailed evaluation, lateral displacement (Ux) and vertical displacement (Uy) were extracted at a representative depth where lateral deformation is typically maximized. Observation points were defined along the horizontal direction from the treatment boundary at normalized distances ranging from x = 0 to x = 1.75L.

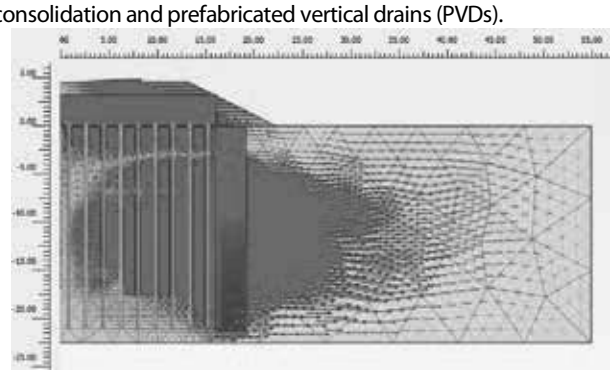
The lateral displacement Ux was used to assess the convergence behavior and propagation extent of horizontal deformation, while Uy represents settlement and vertical deformation distribution. The combined analysis of these components allows for the identification of both the magnitude and spatial extent of the smear zone.

Comparisons of Ux(x) and Uy(x) under different vacuum pressures (70-90 kPa) enable a comprehensive assessment of the effect of vacuum pressure on both deformation magnitude and propagation range.

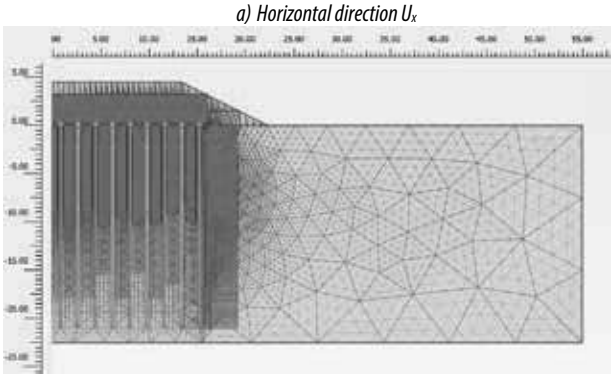
3. RESULTS & DISCUSSION

3.1. Determination of smear zone

The numerical results corresponding to a vacuum pressure of 90 kPa were selected for smear zone analysis, as this represents the highest applied pressure and thus the most unfavorable condition in practice. The displacement field after 180 days of treatment is illustrated in Figure 3, including (a) horizontal displacement (Ux) and (b) vertical displacement (Uy). This figure presents the vector distribution over the entire domain, providing a clear visualization of the deformation pattern and its spatial propagation under combined vacuum consolidation and prefabricated vertical drains (PVDs).



a) Horizontal direction U_x



b) Vertical direction U_y

Figure 3. Displacement vector field of the ground after treatment

Figure 3a shows that horizontal displacement vectors strongly converge toward the treated zone, particularly around the PVD area. The maximum displacement occurs near the boundary of the improved ground and decreases progressively with increasing distance. Meanwhile, Figure 3b indicates that vertical displacement is predominantly downward (settlement) within the treated zone, with larger magnitudes near the surface and diminishing with depth. The combined displacement fields reflect the characteristic mechanism of vacuum consolidation, where soil undergoes vertical compression while simultaneously moving laterally toward the treatment area.

In terms of spatial extent, the smear zone can be identified by the presence of significant displacement vectors beyond the PVD boundary. The results indicate that deformation propagates to approximately 1.75L from the edge of the treated zone (with L = 21 m, corresponding to about 36.75 m). Within this range, both horizontal and vertical displacements remain appreciable, indicating a clear mechanical interaction between the improved ground and the surrounding soil. Beyond this distance, displacement vectors rapidly diminish and approach zero, suggesting that the influence of ground improvement becomes negligible.

Additionally, the results reveal that the most significant deformation occurs at a depth of approximately L/2, where the interaction between pore pressure dissipation and soil deformation is maximized. At this depth, horizontal displacement also reaches its peak value. Therefore, this level is selected as a representative section for subsequent analysis of displacement variation with distance.

Table 2 presents the variation of horizontal (Ux) and vertical (Uy) displacements with normalized distance (x/L) at two representative depths, y = L/2 and y = L. The results clearly demonstrate the attenuation of deformation with distance under combined surcharge loading and vacuum pressure.

Table 2. Variation of horizontal (Ux) and vertical (Uy) displacements with normalized distance (x/L) at depths y = L/2 and y = L (vacuum pressures - VC = 90kPa)

	y = L/2		**y = L**	
x	**U_x (m)**	**U_y(m)**	**U_x(m)**	**U_y(m)**
0	0.540	-1.420	0.611	-0.367
0.25L	0.760	-0.600	0.495	-0.050
0.5L	0.700	-0.168	0.411	-0.044
0.75L	0.510	0.070	0.388	-0.039
1L	0.380	0.140	0.186	-0.005
1.25L	0.260	0.160	0.087	0.005
1.5L	0.150	0.140	0.035	0.008
1.75L	0.009	0.120	0.009	0.006

At depth y = L/2, horizontal displacement (Ux) remains positive and decreases with distance, indicating outward lateral movement of the soil from the treated zone. The magnitude is highest near the treatment boundary and gradually reduces to nearly zero at x = 1.75L. This trend confirms that lateral deformation has a finite extent and diminishes with distance. This behavior can be attributed to the combined effects of surcharge loading and stress redistribution, which induce outward lateral movement at the boundary.

Vertical displacement (Uy) at the same depth transitions from negative values (settlement) near the treated zone to slightly positive values (heave) further away. Within the treated area, vacuum pressure reduces pore water pressure, increases effective stress, and induces significant settlement. Outside the treated zone, outward lateral movement leads to localized expansion, resulting in slight heave. This transition reflects the non-uniform deformation state of the soil mass under combined consolidation and lateral displacement.

At depth y = L, both horizontal and vertical displacements are significantly smaller. Horizontal displacement continues to decrease with distance and becomes negligible at x = 1.75L, while vertical displacement fluctuates around zero with very small magnitudes. This indicates that the influence of ground improvement diminishes with depth, particularly near the bottom of the soft soil layer.

Overall, the results indicate that the smear zone of vacuum-assisted PVD treatment is mainly confined within a distance of less than 1.75L from the treatment boundary. Beyond this range, both horizontal and vertical displacements are negligible and can be considered insignificant for engineering purposes, representing a safe zone for adjacent structures.

3.2. Variation of horizontal displacement with distance and effect of vacuum pressure

Table 3 presents the horizontal (Ux) and vertical (Uy) displacements of the ground at normalized distances (x/L) under three different vacuum pressures (70, 80, and 90 kPa). These results enable a

quantitative assessment of the influence of vacuum pressure on both the magnitude and extent of deformation in soft ground.

Table 3. Comparison of horizontal (Ux) and vertical (Uy) displacements at normalized distances (x/L) under different vacuum pressures

	P = 70 kPa		P = 80 kPa		P = 90 kPa	
x	U_x (m)	U_y (m)	U_x (m)	U_y (m)	U_x (m)	U_y (m)
0	0.425	-0.271	0.554	-0.339	0.611	-0.367
0.25L	0.354	-0.039	0.448	-0.047	0.495	-0.050
0.5L	0.296	-0.031	0.368	-0.037	0.411	-0.044
0.75L	0.192	-0.028	0.272	-0.033	0.388	-0.039
1L	0.162	-0.006	0.18	-0.006	0.186	-0.006
1.25L	0.075	0.005	0.085	0.007	0.087	0.006
1.5L	0.031	0.005	0.034	0.008	0.035	0.008
1.75L	0.005	0.005	0.006	0.006	0.009	0.006

In terms of horizontal behavior, the displacement Ux increases with increasing vacuum pressure at all locations. Specifically, near the edge of the treated area (x = 0), Ux increases from 0.425 m (70 kPa) to 0.611 m (90 kPa), corresponding to an increase of approximately 43.8%. At x = 0.25L, Ux increases from 0.354 m to 0.495 m (39.8%), and at x = 0.5L from 0.296 m to 0.411 m (38.9%). However, as the distance increases, the influence of vacuum pressure gradually diminishes; at x = 1.75L, Ux increases only from 0.005 m to 0.009 m, corresponding to about 80%, but the absolute values are very small and can be considered negligible in engineering practice.

For vertical displacement, Uy is predominantly negative (settlement) near the treated zone and gradually approaches values close to zero or slightly positive (minor heave) at larger distances. As the vacuum pressure increases, the magnitude of settlement also increases significantly. Specifically, at x = 0, Uy increases from -0.271 m (70 kPa) to -0.367 m (90 kPa), corresponding to an increase of approximately 35.4% in magnitude. However, at farther locations such as x ≥ 1.25L, Uy remains very small (|Uy| ≤ 0.008 m), indicating that the vertical influence is nearly negligible.

In terms of spatial distribution, the maximum horizontal displacement consistently occurs near the treated zone (x = 0), while the minimum occurs at x = 1.75L, where Ux is nearly zero. Based on this, the influence of vacuum pressure can be divided into three characteristic zones: (i) a strong smear zone within x ≤ L, where horizontal displacement is large and sensitive to changes in vacuum pressure; (ii) a moderate–weak smear zone within L < x ≤ 1.75L, where displacement still varies but decreases rapidly with distance; and (iii) a negligible smear zone (safe zone) for x > 1.75L, where displacement is very small and can be ignored in engineering analysis. This zoning indicates that the effect of vacuum pressure is mainly concentrated within a distance of approximately L from the treatment boundary and decreases markedly beyond this range.

Overall, the results show that vacuum pressure has a significant effect on the magnitude of displacement, particularly in the region close to the treated area. However, it does not significantly extend the smear zone, as displacements remain very small at larger distances (x ≥ 1.75L) for all pressure levels. This demonstrates that vacuum pressure primarily increases the intensity of deformation within the directly affected zone (x ≤ L), while the extent of deformation propagation changes only marginally (L ≤ x ≤ 1.75L). From an engineering perspective, the region beyond 1.75L (36.75 m) can be considered a safe zone, where both horizontal and vertical displacements are negligible and are almost unaffected by the ground improvement process, regardless of vacuum pressure levels in the range of 70-90 kPa.

These findings are consistent with previous studies. Specifically, studies [2], [3] reported that the smear zone of vacuum consolidation may extend up to 20-23 m from the treatment boundary. Similarly, [7], [8] demonstrated that isotropic consolidation induced by vacuum pressure leads to outward lateral displacement beyond the treated area. This agreement confirms that the present numerical model reasonably captures the actual behavior of soft ground under vacuum consolidation.

4. CONCLUSION

This study clarifies the deformation characteristics of soft ground treated by vacuum-assisted PVD using finite element analysis. The results indicate that horizontal displacement reaches its maximum at the treatment boundary and decreases rapidly with distance, while vertical displacement is dominated by settlement within the treated zone and diminishes outward.

The smear zone extends to approximately 1.75L, which can be divided into a strong smear zone (x ≤ L), a transition zone (L < x ≤ 1.75L), and a safe zone (x > 1.75L), where displacements are negligible. Vacuum pressure significantly increases deformation magnitude within the near-field zone (x ≤ L), with increases exceeding 15%, but does not significantly affect the extent of the smear zone.

These findings provide a scientific basis for determining the extent of ground improvement influence and defining safe distances for adjacent structures when applying vacuum consolidation methods.

REFERENCES

[1] Long, P. V., Nguyen, L. V., Bergado, D. T., & Balasubramaniam, A. S. Performance of PVD improved soft ground using vacuum consolidation methods with and without airtight membrane. Geotextiles and Geomembranes, 43(6), 1-11, 2015. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.05.007

[2] Vinh, L. B. Phân tích ảnh hưởng của bấc thấm lý tưởng và bấc thấm không lý tưởng trong mô phỏng xử lý nền bằng phương pháp hút chân không kết hợp với bấc thấm. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi, 4, 2015.

[3] Nghia, N. T. Modelling of a vacuum consolidation project in Vietnam. HCMCOUJS - Engineering and Technology, 9(1), 78–101, 2019. https://doi.org/10.46223/HCMCOUJS.tech.en.9.1.354.2019

[4] T. Ho, T. Bum, and T. Dat. (2016). Ground Improvement via Vacuum Consolidation Method in Vietnam Ground Improvement via Vacuum Consolidation Method in Vietnam. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 47(4), 80–88, 2016.

[5] Phan, M. S., Tran, D. K., Le, N. T., Pham, M. T., & Pham, H. H. G. An evaluation of vacuum pressure effects in ground improvement using prefabricated vertical drain (PVD). Journal of Construction, *pp. 276–280,* 2025.

[6] Nu, N. T. Ứng dụng phương pháp xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước tại nhà máy nhiệt điện Long Phú - Sóc Trăng. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 55, 46–54, 2016.

[7] Vu, M. Q., Wang, B., & Tian, B. Vacuum preloading with vertical drains: Theory and recent developments and applications. 2009.

[8] Indraratna, B., Bamunawita, C., & Khabbaz, H. Numerical modeling of vacuum preloading and field applications. Canadian Geotechnical Journal, 41(6), 1098-1110, 2004. https://doi.org/10.1139/t04-054

[9] Chai, J. C., Carter, J. P., & Hayashi, S. Ground deformation induced by vacuum consolidation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(12), 1552–1561, 2005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1552)

Remote sensing techniques for monitoring and quantitative analysis of crack development in building walls: A comprehensive review

Tổng quan các kỹ thuật cảm biến từ xa để giám sát và phân tích định lượng sự phát triển vết nứt trong tường nhà

> TRONG NGHIA DO
Faculty of Civil Engineering, Mien Tay construction university
Email: dotrongnghia@mtu.edu.vn

ABSTRACT

Crack formation in building walls is a key indicator of structural deterioration and serviceability issues. Traditional inspection methods are often labor-intensive, subjective, and limited in spatial coverage. In recent years, Remote sensing technologies have emerged as powerful tools for non-contact, large-scale structural health monitoring. This review presents a comprehensive synthesis of remote sensing techniques for crack detection and analysis in building walls, including UAV photogrammetry, terrestrial laser scanning, infrared thermography, and satellite-based monitoring. The paper critically evaluates image processing and deep learning approaches for crack identification and quantification, with emphasis on crack geometry extraction and temporal evolution analysis. Key challenges such as resolution limitations, environmental sensitivity, and data integration are discussed. Finally, future research directions, including multi-sensor fusion and digital twin integration, are highlighted. This review provides a consolidated framework for researchers and engineers to advance remote sensing-based crack monitoring systems.

Keywords: Remote sensing; crack detection; UAV photogrammetry; LiDAR; structural health monitoring; deep learning.

TÓM TẮT

Sự hình thành vết nứt trên tường nhà là một chỉ báo quan trọng về sự xuống cấp cấu trúc và các vấn đề về khả năng sử dụng. Các phương pháp kiểm tra truyền thống thường tốn nhiều công sức, mang tính chủ quan và bị hạn chế về phạm vi không gian. Trong những năm gần đây, công nghệ viễn thám đã nổi lên như những công cụ mạnh mẽ để giám sát sức khỏe cấu trúc quy mô lớn theo phương thức không tiếp xúc. Bài tổng quan này trình bày một cách toàn diện các kỹ thuật viễn thám trong phát hiện và phân tích vết nứt trên tường công trình, bao gồm đo ảnh lập thể bằng thiết bị bay không người lái (UAV photogrammetry), quét laser mặt đất, chụp ảnh nhiệt hồng ngoại và giám sát dựa trên vệ tinh. Bài báo đánh giá một cách phê bình các phương pháp xử lý ảnh và học sâu trong nhận dạng và định lượng vết nứt, với trọng tâm là trích xuất hình học vết nứt và phân tích sự phát triển theo thời gian Các thách thức chính như hạn chế về độ phân giải, độ nhạy với điều kiện môi trường và vấn đề tích hợp dữ liệu cũng được thảo luận. Cuối cùng, các định hướng nghiên cứu trong tương lai, bao gồm tích hợp đa cảm biến và ứng dụng bản sao số (digital twin), được nhấn mạnh. Bài tổng quan này cung cấp một khuôn khổ tổng hợp nhằm hỗ trợ các nhà nghiên cứu và kỹ sư trong việc phát triển các hệ thống giám sát vết nứt dựa trên công nghệ viễn thám.

Từ khóa: Viễn thám; phát hiện vết nứt; chụp ảnh bằng UAV; LiDAR; giám sát sức khỏe cấu trúc; học sâu.

1. INTRODUCTION

Cracking in building walls is a critical indicator of structural performance and long-term durability. These cracks may arise from multiple interacting mechanisms, including material degradation, shrinkage, thermal expansion and contraction, differential settlement, and cyclic loading effects such as seismic or environmental actions. From a structural mechanics perspective, crack initiation typically reflects localized stress concentrations exceeding the tensile capacity of materials, while crack propagation is governed by fracture mechanics and progressive stiffness degradation (Structural Health Monitoring). If not properly monitored, such damage can evolve into serviceability issues or even structural failure [1], [2]. Accurate monitoring of crack initiation and propagation is therefore essential for assessing structural integrity and ensuring timely maintenance. Traditional inspection methods-such as visual surveys, crack gauges, strain gauges, and

linear variable differential transformers (LVDTs)-have been widely used in practice. However, these approaches suffer from several inherent limitations. Manual inspections are subjective and dependent on inspector expertise, while contact-based sensors provide only point-wise or localized measurements and may fail to capture the global deformation pattern of the structure. Furthermore, installation and maintenance of such sensors can be intrusive and impractical for large-scale or inaccessible structures [3], [4]. To overcome these limitations, non-contact monitoring techniques based on remote sensing have gained increasing attention over the past two decades. Advances in sensing platforms and data processing algorithms have enabled high-resolution, full-field, and repeatable measurements of structural conditions. For instance, unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with high-resolution cameras allow rapid and cost-effective inspection of building facades and hard-to-reach areas. Similarly, terrestrial laser scanning (TLS) provides dense 3D point clouds that can be used to detect surface deformation and crack geometry with millimeter-level accuracy. Infrared thermography offers additional capabilities by identifying subsurface defects and delamination through thermal anomalies (Infrared thermography) [5-7]. Despite these advancements, significant challenges remain in translating remote sensing data into reliable structural assessment metrics. A major limitation lies in the quantitative characterization of crack evolution, particularly under multi-temporal monitoring scenarios. While many studies focus on crack detection using image processing or deep learning techniques, fewer investigations address the accurate measurement of crack width, depth, and propagation rate over time. This gap is critical because structural safety assessment depends not only on the presence of cracks but also on their growth behavior and interaction with loading conditions [8], [9]. Another key challenge is the integration of multi-source data from different sensing modalities (e.g., UAV imagery, TLS point clouds, and thermal data). Each technique has distinct spatial resolutions, noise characteristics, and environmental sensitivities, making data fusion and temporal consistency difficult. Moreover, environmental factors such as lighting conditions, surface texture, and weather effects can significantly influence detection accuracy, particularly in vision-based methods [10]. Therefore, robust multi-temporal and multi-sensor frameworks are still lacking, limiting the applicability of remote sensing for long-term structural health monitoring. Given these challenges, this paper aims to provide a comprehensive review of remote sensing techniques for crack monitoring in building structures. Specifically, it (i) reviews state-of-the-art sensing technologies, including UAV-based imaging, TLS, and thermographic methods; (ii) summarizes existing approaches for crack detection and quantitative characterization; (iii) identifies current limitations and research gaps, particularly in multi-temporal analysis and data fusion; and (iv) proposes future research directions toward more reliable, automated, and scalable structural health monitoring systems.

2. OVERVIEW OF REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR CRACK MONITORING

2.1. UAV-Based Photogrammetry

UAV photogrammetry is widely used for crack detection due to its flexibility, high spatial resolution, and cost-effectiveness. By integrating high-resolution imaging with photogrammetry methods such as structure-from-motion (SfM), UAVs can produce detailed orthophotos and 3D models for structural assessment. Under optimal conditions–such as low flight altitude and proper lighting–sub-millimeter ground sampling distances can be achieved, enabling detection of fine cracks (<1 mm), as shown in Figs. 1&2 [11], [12].

Figure 1. Facade inspection drones [13]

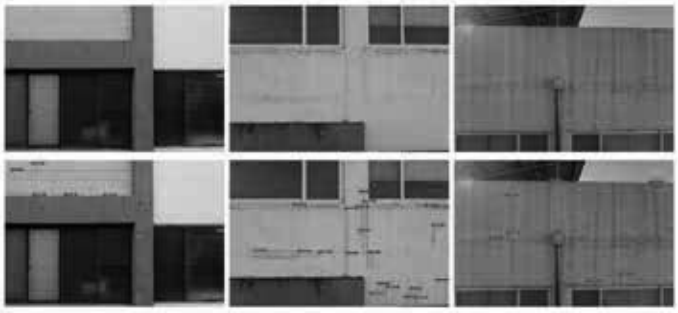


Figure 2. Defining structural cracks in exterior walls of concrete buildings using an unmanned aerial vehicle [14]

The main advantages include high-resolution imaging, rapid data acquisition, and accessibility to difficult or hazardous areas, such as high-rise facades and bridge components. These features improve inspection efficiency, safety, and spatial coverage compared to conventional methods [15]. However, UAV photogrammetry also has limitations. Detection accuracy is sensitive to environmental conditions, particularly lighting variations, shadows, and surface reflectivity, which can reduce crack visibility. Additionally, occlusions from structural elements or vegetation may lead to incomplete data capture. While crack detection is effective, precise quantification of crack width remains challenging due to resolution limits and image distortion [10], [16]. Overall, UAV photogrammetry is an efficient tool for large-scale crack monitoring, though accuracy improvements and data integration remain necessary.

2.2. Terrestrial Laser Scanning (TLS)

Terrestrial Laser Scanning (TLS) is a powerful remote sensing technique that provides dense and accurate 3D point clouds for detailed geometric analysis of structural surfaces. Based on the principle of LiDAR, TLS systems emit laser pulses and measure the return time to reconstruct surface geometry with millimeter-level precision. This capability enables accurate mapping of surface irregularities, deformation patterns, and crack-related discontinuities, making TLS particularly valuable for structural health monitoring of large infrastructures such as tunnels, bridges, and facades [17], [18].

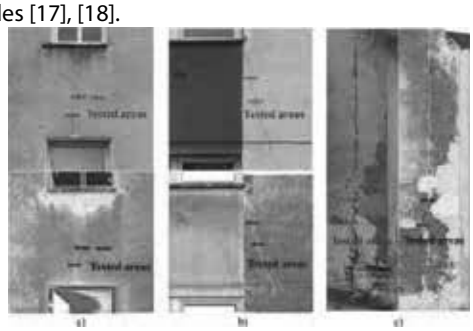


Figure 3. Tested objects: photographs and sample point clouds with marked areas selected for analyses [19]

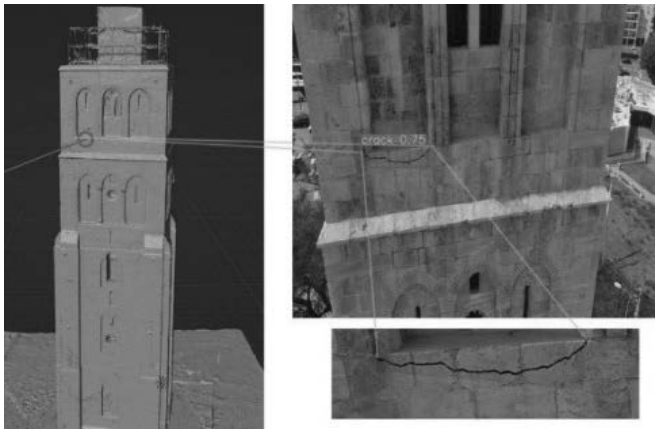


Figure 4. Autonomous inspection of high-rise buildings for facade detection and 3D modeling using UAVs [20]

One of the main advantages of TLS is its high geometric accuracy and ability to capture full-field 3D data (Fig. 4). Unlike image-based methods, TLS directly measures spatial coordinates, allowing robust quantification of crack geometry, including orientation, length, and displacement across crack surfaces [21], [22]. Additionally, multi-temporal TLS surveys enable change detection and deformation tracking, supporting long-term monitoring of structural deterioration [23], [24]. However, TLS also presents several limitations. The high cost of equipment and data processing can limit widespread adoption, particularly for routine inspections. Moreover, TLS struggles to detect very fine cracks (typically <1 mm) because crack visibility depends on point density and laser footprint size. Surface reflectivity and scanning angle can also affect data quality, leading to noise or missing points in complex geometries [25], [26]. Overall, TLS is highly effective for precise geometric characterization and large-scale deformation monitoring, but it is often complemented by high-resolution imaging techniques for fine crack detection.

2.3. Infrared Thermography (IRT)

Infrared Thermography (IRT) is a non-destructive remote sensing technique that detects subsurface defects by measuring temperature variations on structural surfaces. It is based on the principle that discontinuities–such as cracks, voids, or delaminations–alter heat flow within a material, leading to localized thermal anomalies that can be captured using infrared cameras (Infrared thermography). In civil engineering applications, both passive and active thermography are employed: passive IRT relies on natural environmental heating (e.g., solar radiation), while active IRT uses external heat sources to enhance defect visibility, as shown in Fig. 5 [27], [28].

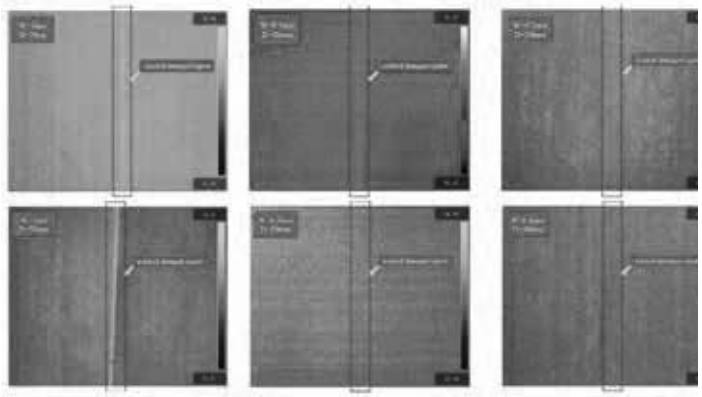


Figure 5. Thermal images of surface temperature of concrete test block [29]

Figure 6. Infrared thermal detection of wall cracks of earthquake-damaged buildings [30]

One of the key advantages of IRT is its ability to detect hidden or subsurface cracks that are not visible to conventional optical methods (Fig. 6). This makes it particularly valuable for identifying internal defects such as delamination in concrete, moisture intrusion, or debonding in composite materials [31], [32]. Additionally, IRT is a non-contact and rapid technique, enabling efficient inspection of large areas without requiring physical access to the structure [33], [34]. However, the effectiveness of IRT is strongly influenced by environmental conditions. Factors such as solar radiation, ambient temperature, wind, and humidity can significantly affect thermal readings and may introduce noise or false indications [35], [36]. Moreover, successful detection requires sufficient thermal contrast between defective and intact regions, which may not always be present, particularly in thick or thermally homogeneous materials [37]. The depth of detectable defects is also limited, as thermal signals attenuate with depth [38]. Overall, IRT is a powerful tool for rapid, non-contact detection of subsurface defects, but its reliability depends on controlled conditions and is often enhanced when combined with complementary techniques such as UAV imaging or laser scanning.

2.4. Satellite Remote Sensing

Satellite-based remote sensing techniques, particularly Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), have become increasingly important for monitoring large-scale ground and structural deformation associated with cracking. InSAR operates based on the principle of Interferometric Synthetic Aperture Radar, where phase differences between repeated radar acquisitions are used to detect surface displacement with millimeter-level sensitivity over wide areas. This makes it especially suitable for tracking deformation processes such as land subsidence, foundation settlement, and structural movement that may lead to crack development in buildings and infrastructure [39], [40].

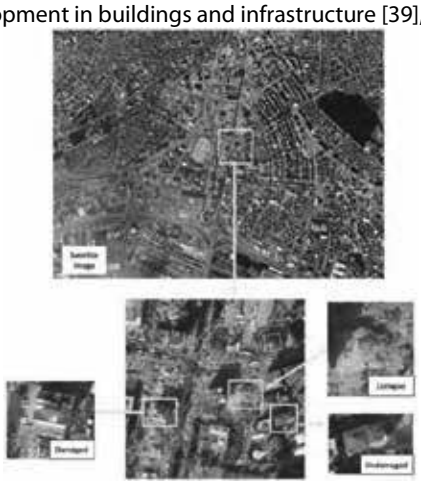


Figure 7. Illustration of building damage levels on the satellite image of Hatay city [41]

One of the key advantages of InSAR is its ability to provide large spatial coverage and long-term monitoring through continuous satellite observations. Advanced techniques such as Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) and Small Baseline Subset (SBAS) allow time-series analysis of deformation, enabling the identification of progressive structural movements and early warning of potential damage [42], [43]. This is particularly valuable for urban areas and critical infrastructure networks, where conventional ground-based monitoring would be costly and impractical (Fig. 7). However, satellite-based methods also have notable limitations. The spatial resolution of InSAR, although improving, is generally insufficient to directly detect small cracks or localized damage at the structural scale. Instead, it provides indirect measurements of deformation, requiring interpretation to relate observed displacement to actual cracking behavior. Additionally, signal decorrelation due to vegetation, atmospheric disturbances, and geometric effects can reduce data quality and reliability [44]. Overall, InSAR is a powerful tool for regional-scale and long-term deformation monitoring, but it is most effective when integrated with high-resolution, local sensing techniques (e.g., UAV or TLS) for detailed crack assessment.

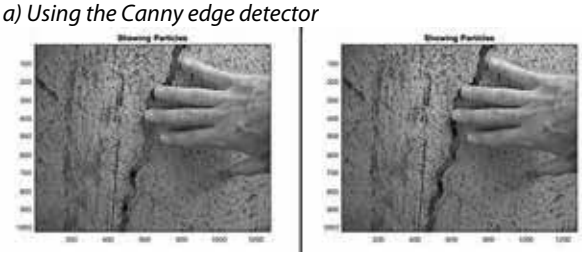
3. CRACK DETECTION AND QUANTIFICATION METHODS

3.1. Traditional image processing techniques

Traditional image processing techniques represent the earliest approaches for crack detection in building walls, primarily relying on pixel intensity variations to identify discontinuities associated with cracks. These methods typically include edge detection (e.g., Canny and Sobel operators), thresholding, and morphological operations.

Edge detection algorithms in Fig. 8 identify crack boundaries by detecting abrupt intensity gradients, making them effective for well-defined cracks under controlled conditions [45], [46].

a) Using the Canny edge detector



b) Using Sobel Edge Detection (left) and Crack Detection using Canny Edge Detection (right)

Figure 8. Crack detection [47], [48]

Thresholding techniques, such as global or adaptive thresholding, segment crack regions by separating darker crack pixels from the surrounding surface, while morphological operations (e.g., dilation, erosion, and closing) are employed to refine crack continuity and remove noise, as illustrated in Figs. 9&10 [49].

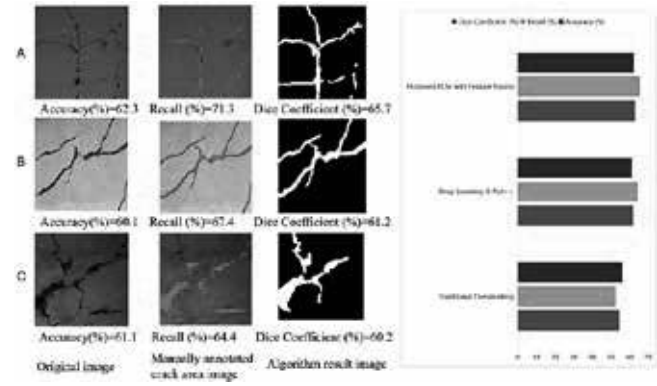


Figure 9. (A) Dense cracks; (B) Intersecting cracks; (C) Severe damaged dense cracks. Comparison of image segmentation performance under complex conditions [50]

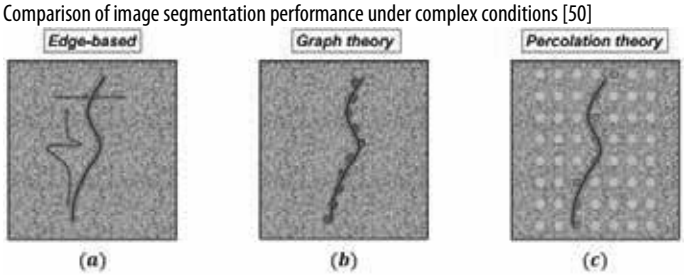


Figure 10. An overview of morphology-based crack detection methods [51]

Despite their simplicity and computational efficiency, these methods are highly sensitive to environmental factors, including lighting variation, surface texture, and noise, often leading to false detections in the presence of shadows, stains, or material heterogeneity [16], [52]. Consequently, while traditional techniques remain useful for preliminary assessments and controlled experiments, their limitations in robustness and generalization have motivated the development of more advanced, learning-based approaches for reliable crack detection and monitoring.

3.2. Deep learning-based methods

Recent advances in artificial intelligence (AI), particularly deep learning, have significantly improved automated crack detection. Models based on Convolutional Neural Networks (CNNs) can effectively extract features from images and distinguish cracks from complex backgrounds, outperforming traditional methods [8]. Architectures such as U-Net enable pixel-level segmentation for precise crack geometry, while YOLO provides fast and efficient object detection suitable for real-time applications, as shown in Fig. 11 [53]. These approaches offer high accuracy-often exceeding 90%-and strong robustness under varying surface conditions. They also allow automated processing of large datasets, reducing manual inspection effort [10]. However, challenges remain. Deep learning models require large labeled datasets, which are costly and time-consuming to develop. In addition, high computational demand can limit real-time deployment, and model performance may decrease when applied to new environments [16]. Overall, AI-based methods provide powerful tools for crack detection, though improvements in data efficiency and generalization are still needed.

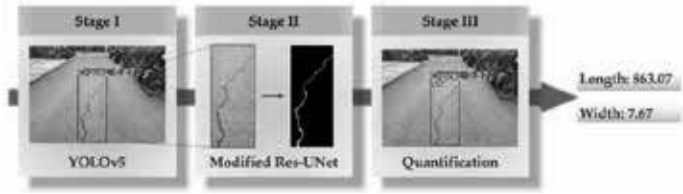


Figure 11. Flowchart of the proposed architecture for detecting and quantifying road cracks [54]

3.3. Crack geometry quantification

Crack geometry quantification is essential for assessing structural damage and performance. Key parameters include crack width, length, orientation, and density, which together describe the severity and evolution of cracking. Among these, crack width is the most critical, as it relates directly to durability, stiffness degradation, and serviceability limits, while orientation and distribution help identify underlying stress mechanisms [16], [55]. In image-based methods, crack dimensions are typically obtained using pixel measurements and converted to real-world units through: $w = N_p \ x \ S$

Where N_p is the number of pixels and S is the spatial resolution derived from Camera calibration [56].

Advanced techniques such as sub-pixel edge detection and deep learning segmentation improve measurement accuracy. However, results remain sensitive to image resolution, lighting conditions, and distortion, especially for very fine cracks [8].

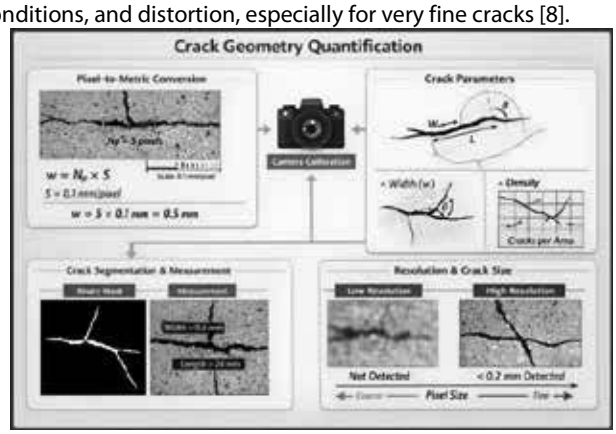


Figure 12. Crack geometry quantification

Fig. 12 describes the schematic of crack geometry quantification is developed based on established image-based measurement frameworks, including pixel-to-metric conversion [57], crack feature extraction [58], and segmentation-based measurement workflows [59]. This figure presents an integrated framework for crack geometry quantification using image-based techniques. It begins with pixel-to-metric conversion, where camera calibration defines the spatial resolution required to transform pixel measurements into real-world units. The workflow then applies segmentation methods to isolate cracks and generate binary masks for accurate measurement of crack width and length. Key geometric parameters-width, length, orientation, and density-are extracted to evaluate structural damage and deformation behavior. The resolution analysis highlights that high-resolution imaging is essential for detecting fine cracks (<0.2 mm), while low-resolution images may fail to capture small defects. Overall, the figure emphasizes the importance of calibration, segmentation, and image quality in reliable crack assessment.

4. APPLICATIONS IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Remote sensing techniques have been widely applied across different structural systems, including concrete buildings, masonry structures, bridges, and tunnels, each demonstrating distinct strengths and limitations depending on the sensing modality and structural context.

4.1. Concrete buildings (UAV + AI-based monitoring)

Remote sensing techniques have been widely applied for crack monitoring in concrete buildings, providing efficient and non-contact alternatives to traditional inspection methods. UAV photogrammetry enables high-resolution surface imaging and supports automated crack detection through advanced image processing and deep learning algorithms [8]. Infrared thermography (IRT) extends this capability by identifying subsurface defects such as delamination and moisture ingress through thermal anomalies [27], [35]. In contrast, terrestrial laser scanning (TLS) offers high geometric accuracy and dense 3D point clouds, allowing precise quantification of crack geometry and structural deformation [21], [22].

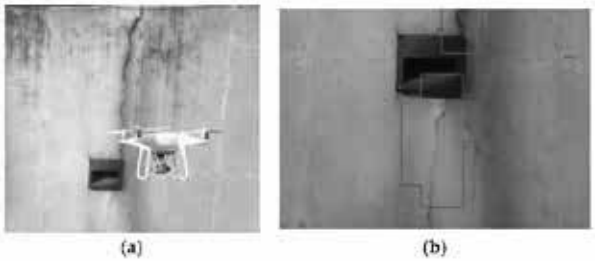


Figure 13. Automated crack detection using UAV: (a) Video shooting using UAV, (b) Example image of real-time crack detection [60]

These techniques are particularly effective for inspecting large or inaccessible structures, such as high-rise facades, and support multi-temporal monitoring for tracking crack evolution under environmental and mechanical loading [15], [16]. However, each method has inherent limitations, and integrated approaches combining UAV, IRT, and TLS are increasingly recommended to achieve comprehensive and reliable structural health assessment.

4.2. Masonry Structures (TLS + Photogrammetry)

Remote sensing techniques have been increasingly applied to crack monitoring in masonry structures, where damage is strongly influenced by material heterogeneity, weak mortar joints, and environmental effects. UAV photogrammetry enables efficient, high-resolution mapping of facade cracks, supporting large-scale inspection and digital documentation of historic buildings [11], [61]. Infrared thermography (IRT) is particularly effective for detecting subsurface defects, such as voids, moisture ingress, and debonding, which often precede visible cracking [27]. Meanwhile, terrestrial laser scanning (TLS) provides accurate 3D geometric data for quantifying crack width and structural deformation, which is essential for stability assessment [22]. These techniques enable non-invasive and multi-temporal monitoring, making them highly suitable for heritage conservation, where physical intervention must be minimized [62]. However, challenges remain due to surface irregularities, weathering, and biological growth, which can affect detection accuracy.

Figure 14 presents the final crack opening map of the St Ilyas apse, where a maximum crack width of 10 cm can be observed. Only the top part of this crack was analysed, the crack continues (with smaller widths) at lower elevations.

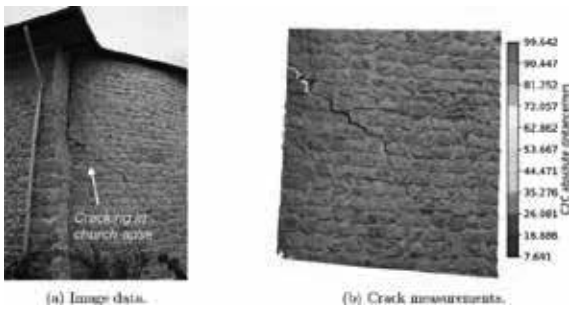


Figure 14. Fully automated crack measurements from the photogrammetry point cloud of the apse of St Ilias church [63]

5. CHALLENGES AND LIMITATIONS

Despite significant advances, remote sensing-based crack monitoring in building walls still faces several critical challenges related to sensing capability, data processing, and system integration. One major limitation is the spatial resolution of sensing systems, which restricts the detection of micro-cracks (<0.1 mm), particularly under field conditions where imaging distance and environmental factors reduce accuracy [16], [64]. In addition, lighting variability, surface texture, and noise introduce false detections, as shadows and stains may be misclassified as cracks [52]. Occlusions from structural elements further compromise detection continuity.

From a data processing perspective, high-resolution imaging generates large datasets, posing challenges for storage, transmission, and real-time analysis. Although deep learning methods improve detection accuracy, they often suffer from limited generalization across different materials and environmental conditions [8]. Furthermore, the integration of multi-sensor data, such as UAV imagery, TLS point clouds, and infrared thermography, remains difficult due to differences in resolution, coordinate systems, and data formats. The absence of standardized data fusion frameworks and evaluation protocols further limits practical implementation. Addressing these issues is essential for developing reliable, scalable, and fully integrated structural health monitoring systems.

6. CONCLUSIONS

Remote sensing techniques provide powerful tools for non-contact crack monitoring; however, their effectiveness depends on the complementary capabilities of different sensing modalities. UAV photogrammetry offers high-resolution surface imaging and rapid coverage, but its detection accuracy is limited by image resolution and environmental conditions, with typical field detection thresholds around 0.2–1 mm. In contrast, terrestrial laser scanning (TLS) delivers millimeter-level geometric accuracy, making it suitable for quantifying crack morphology and structural deformation, although it is less effective for detecting very fine cracks due to point density limitations.

Infrared thermography (IRT) overcomes the limitations of optical methods by detecting subsurface defects through thermal contrasts. However, its performance depends strongly on environmental conditions and thermal excitation, and defect detection is generally limited to shallow depths due to heat diffusion. Satellite-based techniques such as InSAR provide valuable large-scale deformation monitoring but cannot directly resolve individual cracks.

A major challenge is the lack of consistency in crack quantification across different methods, as well as difficulties in multi-sensor data integration due to differences in resolution and coordinate systems. Overall, no single technique is sufficient; integrated multi-sensor approaches are essential for reliable and comprehensive structural health monitoring.

REFERENCES

[1] H. Sohn et al., "A review of structural health monitoring literature: 1996–2001," Los Alamos National Laboratory, USA, vol. 1, no. 16, pp. 10-12989, 2003.

[2] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 365, no. 1851, pp. 303-315, 2007.

[3] B. Glisic and D. Inaudi, Fibre optic methods for structural health monitoring. John Wiley & Sons, 2007.

[4] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han, "Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review," The Scientific World Journal, vol. 2014, no. 1, p. 652329, 2014.

[5] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, Close-range photogrammetry and 3D imaging. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2023.

[6] T. Rakha and A. Gorodetsky, "Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones," Automation in construction, vol. 93, pp. 252-264, 2018.

[7] S. Jung, D. Choi, S. Song, and H. Myung, "Bridge inspection using unmanned aerial vehicle based on HG-SLAM: Hierarchical graph-based SLAM," Remote sensing, vol. 12, no. 18, p. 3022, 2020.

[8] Y. J. Cha, W. Choi, and O. Büyüköztürk, "Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 32, no. 5, pp. 361-378, 2017.

[9] S. Li, X. Zhao, and G. Zhou, "Automatic pixel-level multiple damage detection of concrete structure using fully convolutional network," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 34, no. 7, pp. 616-634, 2019.

[10] B. F. Spencer Jr, V. Hoskere, and Y. Narazaki, "Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring," Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 199-222, 2019.

[11] F. Nex and F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: A review," Applied geomatics, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2014.

[12] M. Westoby, J. Brasington, N. Glasser, M. Hambrey, and J. Reynolds, "Structure-from-Motion photogrammetry: A novel, low-cost tool for geomorphological applications," Geomorphology, vol. 179, pp. 300-314, 2012.

[13] Advexure. "Why Use Drones for Building & Facade Inspections?" https://advexure.com/pages/facade-inspection-drones?srsltid=AfmBOooJKyn-mYKpBTehFdW2Qx6QNtkzkmX9_-DbjCgcBMF_kXbiyaiZ&utm_source=chatgpt.com (accessed.

[14] H. J. Woo, W. H. Hong, J. Oh, and S. C. Baek, "Defining structural cracks in exterior walls of concrete buildings using an unmanned aerial vehicle," Drones, vol. 7, no. 3, p. 149, 2023.

[15] A. Ellenberg, A. Kontsos, F. Moon, and I. Bartoli, "Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery," Structural Control and Health Monitoring, vol. 23, no. 9, pp. 1168-1179, 2016.

[16] C. M. Yeum and S. J. Dyke, "Vision-based automated crack detection for bridge inspection," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 30, no. 10, pp. 759-770, 2015.

[17] D. D. Lichti, "Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner system," ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 61, no. 5, pp. 307-324, 2007.

[18] M. J. Olsen, F. Kuester, B. J. Chang, and T. C. Hutchinson, "Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment," Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 24, no. 3, pp. 264-272, 2010.

[19] P. Stałowska, C. Suchocki, and M. Rutkowska, "Crack detection in building walls based on geometric and radiometric point cloud information," Automation in Construction, vol. 134, p. 104065, 2022.

[20] P. Mathur, C. Sharma, and S. Azeemuddin, "Autonomous inspection of high-rise buildings for façade detection and 3D modeling using UAVs," IEEe Access, vol. 12, pp. 18251-18258, 2024.

[21] D. Lichti, M. P. Stewart, M. Tsakiri, and A. J. Snow, "Calibration and testing of a terrestrial laser scanner," International archives of Photogrammetry and Remote sensing, vol. 33, no. B5/2; PART 5, pp. 485-492, 2000.

[22] A. Pesci, G. Teza, and E. Bonali, "Terrestrial laser scanner resolution: Numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization," Remote Sensing, vol. 3, no. 1, pp. 167-184, 2011.

[23] M. H. Zakaria, H. Fawzy, M. El-Beshbeshy, and M. Farhan, "A comparative study of terrestrial laser scanning and photogrammetry: Accuracy and applications," Civil Engineering Journal, vol. 11, no. 03, 2025.

[24] G. Teza, A. Pesci, R. Genevois, and A. Galgaro, "Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation," Geomorphology, vol. 97, no. 3-4, pp. 424-437, 2008.

[25] Y. Reshetyuk, "Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning," KTH, 2009.

[26] S. Pu and G. Vosselman, "Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, no. 6, pp. 575-584, 2009.

[27] X. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing," (No Title), 2001.

[28] C. Meola and G. M. Carlomagno, "Recent advances in the use of infrared thermography," Measurement science and technology, vol. 15, no. 9, pp. R27-R58, 2004.

[29] W. Gu, X. Liu, and Z. Li, "Sustainable Infrastructure Maintenance: Crack Depth Detection in Tunnel Linings via Natural Temperature Variations and Infrared Imaging," Sustainability, vol. 16, no. 9, p. 3731, 2024.

[30] J. W. Kim, H. W. Choi, S. K. Kim, and W. S. Na, "Review of image-processing-based technology for structural health monitoring of civil infrastructures," Journal of Imaging, vol. 10, no. 4, p. 93, 2024.

[31] K. Tomita and M. Y. L. Chew, "A review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings," Sensors, vol. 22, no. 2, p. 423, 2022.

[32] A. Karpf, M. Selig, A. Alchaar, and M. Iskander, "Detection of cracks in concrete using near-IR fluorescence imaging," Scientific Reports, vol. 13, no. 1, p. 18880, 2023.

[33] M. Clark, D. M. McCann, and M. Forde, "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. NDT&E International, London, v. 36," 2003.

[34] G. F. Sirca Jr and H. Adeli, "Infrared thermography for detecting defects in concrete structures," Journal of Civil Engineering and Management, vol. 24, no. 7, pp. 508-515, 2018.

[35] B. Milovanović and I. Banjad Pečur, "Review of active IR thermography for detection and characterization of defects in reinforced concrete," Journal of Imaging, vol. 2, no. 2, p. 11, 2016.

[36] J. A. Rocha and Y. V. Póvoas, "Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art," Revista Alconpat, vol. 7, no. 3, pp. 200-214, 2017.

[37] B. Milovanović, M. Gaši, and S. Gumbarević, "Principal component thermography for defect detection in concrete," Sensors, vol. 20, no. 14, p. 3891, 2020.

[38] R. O. Oh et al., "Evaluation of Delaminations and Defects in Concrete Deck Using Non-Destructive Multi-Physical Scanning Technology," Sustainability, vol. 16, no. 21, p. 9225, 2024.

[39] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.

[40] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface," Reviews of geophysics, vol. 36, no. 1, pp. 441-500, 1998.

[41] K. Hacıefendioğlu, H. B. Başağa, V. Kahya, K. Özgan, and A. C. Altunışık, "Automatic detection of collapsed buildings after the 6 February 2023 Türkiye earthquakes using post-disaster satellite images with deep learning-based semantic segmentation models," Buildings, vol. 14, no. 3, p. 582, 2024.

[42] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers," Geophysical research letters, vol. 31, no. 23, 2004.

[43] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR interferograms IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40 (11), 2375–2383," ed, 2002.

[44] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthéry, and B. Crippa, "Persistent scatterer interferometry: A review," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 115, pp. 78-89, 2016.

[45] I. Abdel-Qader, O. Abudayyeh, and M. E. Kelly, "Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges," Journal of computing in civil engineering, vol. 17, no. 4, pp. 255-263, 2003.

[46] Y. Fujita and Y. Hamamoto, "A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces," Machine Vision and Applications, vol. 22, no. 2, pp. 245-254, 2011.

[47] Z. Chen and T. C. Hutchinson, "Image-based framework for concrete surface crack monitoring and quantification," Advances in Civil Engineering, vol. 2010, no. 1, p. 215295, 2010.

[48] T. Chisholm, R. Lins, and S. Givigi, "FPGA-based design for real-time crack detection based on particle filter," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 9, pp. 5703-5711, 2019.

[49] H. Oliveira and P. L. Correia, "CrackIT-An image processing toolbox for crack detection and characterization," in 2014 IEEE international conference on image processing (ICIP), 2014: IEEE, pp. 798-802.

[50] Y. Yao, Y. Zhang, Z. Liu, and H. Yuan, "A Bridge Crack Segmentation Algorithm Based on Fuzzy C-Means Clustering and Feature Fusion," Sensors, vol. 25, no. 14, p. 4399, 2025.

[51] D. Ai, G. Jiang, S. K. Lam, P. He, and C. Li, "Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure—A review," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 117, p. 105478, 2023.

[52] C. Koch, K. Georgieva, V. Kasireddy, B. Akinci, and P. Fieguth, "A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure," Advanced engineering informatics, vol. 29, no. 2, pp. 196-210, 2015.

[53] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," in International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention, 2015: Springer, pp. 234-241.

[54] L. Deng, A. Zhang, J. Guo, and Y. Liu, "An integrated method for road crack segmentation and surface feature quantification under complex backgrounds," Remote Sensing, vol. 15, no. 6, p. 1530, 2023.

[55] T. C. Rilem, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ-ω design method," Materials and Structures, vol. 36, pp. 560-567, 2003.

[56] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, "Close-range photogrammetry and 3D imaging," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 81, no. 4, pp. 273-274, 2015.

[57] J. Yoon, H. Shin, M. Song, H. Gil, and S. Lee, "A crack width measurement method of UAV Images using high-resolution algorithms," Sustainability, vol. 15, no. 1, p. 478, 2022.

[58] L. Parente et al., "Image-based monitoring of cracks: Effectiveness analysis of an open-source machine learning-assisted procedure," Journal of Imaging, vol. 8, no. 2, p. 22, 2022.

[59] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, "Automated crack detection and measurement based on digital image correlation," Construction and Building Materials, vol. 256, p. 119383, 2020.

[60] B. Kim and S. Cho, "Automated vision-based detection of cracks on concrete surfaces using a deep learning technique," Sensors, vol. 18, no. 10, p. 3452, 2018.

[61] J. Unger, M. Reich, and C. Heipke, "UAV-based photogrammetry: monitoring of a building zone," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; XL-5, vol. 40, pp. 601-606, 2014.

[62] B. Riveiro, M. J. DeJong, and B. Conde, "Automated processing of large point clouds for structural health monitoring of masonry arch bridges," Automation in Construction, vol. 72, pp. 258-268, 2016.

[63] Y. Yang, E. Durgut, M. Ispir, B. Pulatsu, and S. Acikgoz, "Use of post-earthquake point cloud data for forensic evaluation of failures in masonry structures," Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 23, no. 12, pp. 5161-5190, 2025.

[64] G. Morgenthal and N. Hallermann, "Quality assessment of unmanned aerial vehicle (UAV) based visual inspection of structures," Advances in Structural Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 289-302, 2014.

CN TẬP ĐOÀN CÔNG NGHIỆP THAN - KS VIỆT NAM
CÔNG TY KHO VẬN VÀ CẢNG CẨM PHẢ - VINACOMIN

Địa chỉ: Tổ 93 – khu 9B – phường Cửa Ông, TP Cẩm Phả, tỉnh Quảng Ninh
Điện thoại: 02033.865.045

NGÀNH NGHỀ KINH DOANH:

- Chế biến, kinh doanh than.
- Quản lý khai thác Cảng Cẩm Phả và các cảng lẻ khác thuộc Công ty.
- Dịch vụ cứu hộ, lai dắt tàu ra vào Cảng, dịch vụ thông tin liên lạc trong nước và quốc tế.
- Dịch vụ xuất nhập khẩu qua Cảng Cẩm Phả.
- Dịch vụ cung ứng tàu biển.
- Dịch vụ kiểm đếm, giao nhận hàng hóa.
- Dịch vụ xuất nhập khẩu ủy thác và xuất nhập khẩu trực tiếp vật tư hàng hải.
- Dịch vụ bốc xếp và chuyển tải than.
- Dịch vụ vận tải thủy (đường sông, đường biển).

TRUNG TÂM QUY HOẠCH, KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG VÀ BẢO TRÌ ĐƯỜNG BỘ

Địa chỉ: 2233/1, Khu phố Cây Chàm, đường Nguyễn Ái Quốc, phường Trấn Biên, TP Đồng Nai
Email:tvqhkddongnai@gmail.com Phone: 0908 252 616

Kiến tạo chuẩn mực trong kiểm định kiến trúc & quản lý dự án

VINFAST

THU XĂNG ĐỔI ĐIỆN

Phong cách Sành điệu

Feliz II

Chinh phục quãng đường 156KM/lần sạc (**)

MIỄN PHÍ ĐỔI PIN*

TRẢ TRƯỚC 0 ĐỒNG*

(*) Chương trình áp dụng theo điều kiện & điều khoản. Vui lòng liên hệ Hotline 1900 23 23 89 hoặc Đại lý VinFast gần nhất để được tư vấn chi tiết.
(**) Thông số khi lắp thêm pin phụ.
Hình ảnh & màu sắc hiển thị mang tính chất minh hoạ.

TÌM HIỂU NGAY
1900 23 23 89
vinfastauto.com